This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

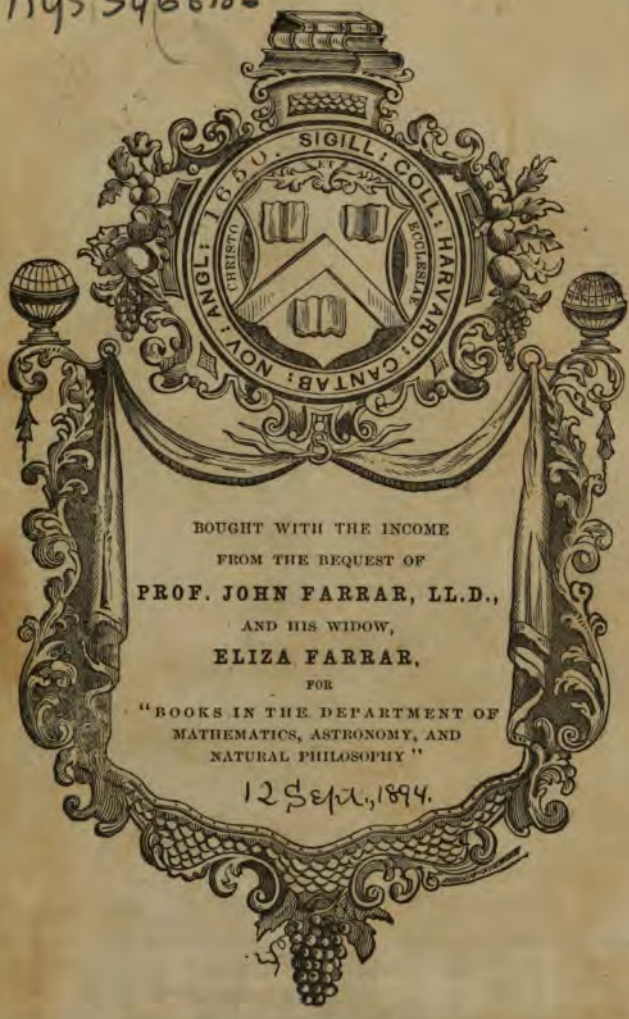
+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

Phys 3468.86



BOUGHT WITH THE INCOME
FROM THE BEQUEST OF
PROF. JOHN FARRAR, LL.D.,
AND HIS WIDOW,
ELIZA FARRAR,
FOR
"BOOKS IN THE DEPARTMENT OF
MATHEMATICS, ASTRONOMY, AND
NATURAL PHILOSOPHY"
12 Sept., 1894.

SCIENCE CENTER LIBRARY

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DES

MESURES ABSOLUES,

MÉCANIQUES,

ÉLECTROSTATIQUES ET ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

ΕΙΟ ΘΕΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΕ

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DES

MESURES ABSOLUES,

MÉCANIQUES,
ÉLECTROSTATIQUES ET ÉLECTROMAGNÉTIQUES,

AVEC APPLICATIONS A DE NOMBREUX PROBLÈMES;

PAR

ALESSANDRO SERPIERI.

TRADUIT DE L'ITALIEN ET ANNOTÉ

PAR

PAUL MARCILLAC.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Augustins, 55.

1886

(Tous droits réservés.)

~~V, 4967~~
Phys 3468.86

HARVARD COLLEGE
SEP 12 1894
LIBRARY

Farrar fund.

AVANT-PROPOS DU TRADUCTEUR.

Bien que les derniers Ouvrages classiques témoignent de l'intérêt particulier qui s'attache de nos jours à l'étude de la science électrique, il n'en est pas moins vrai que les étudiants en général et les électriciens praticiens, de plus en plus nombreux, cherchent vainement des Traités spéciaux de mesures dont la lecture n'exige que des connaissances relativement restreintes en Mathématiques. Il n'existe pas en France, croyons-nous, d'Ouvrage élémentaire de ce genre. C'est pour cette raison que, après avoir lu l'exposition faite par l'auteur des notions les plus nouvelles qui ont trait aux mesures en général et aux mesures électriques en particulier, nous avons jugé utile d'en offrir la traduction au public.

Serpieri avait écrit le présent Ouvrage pour faire suite à son *Traité du potentiel électrique*. La traduction de cette première Partie n'ayant pas encore paru en français, nous avons dû supprimer les renvois par lesquels l'auteur rappelait certains passages de son premier Traité. Nous leur avons substitué quelques Notes résumant les passages désignés ou complétant le texte italien. Ainsi modifié, le présent Ouvrage forme un tout complet : il n'est plus nécessaire de se reporter au *Traité du potentiel*.

Serpieri, mort tout récemment, alors que son œuvre était à peine terminée, n'a pas eu le temps de la revoir, mais il nous a légué le soin de la reviser après lui. Nous avons tenté

de remplir sa volonté dernière en donnant tous nos soins à cette traduction, destinée spécialement aux nombreux élèves de nos Lycées et Institutions spéciales, peu familiarisés encore avec l'étude de l'Électricité et de ses multiples applications.

Nous substituant, et à ce point de vue seulement, au regretté Serpieri, nous demandons à la critique les conseils bienveillants que réclamait l'auteur pour améliorer, autant qu'il nous sera possible, notre modeste traduction. Si, grâce à ces conseils, nous pouvons faire mieux, si surtout ce Livre peut rendre quelques services à la jeunesse studieuse, nous serons satisfait.

P. Marcillac.

Marseille, le 13 mars 1885.

PRÉFACE DE L'AUTEUR.

J'ai écrit ce Traité des Mesures absolues, spécialement appliquées à l'Électricité et à ses usages industriels, pour faire suite à mon Livre : *Du potentiel électrique envisagé au point de vue de l'enseignement élémentaire de l'Électrostatique.*

Dans ce nouvel Ouvrage, qui contient de nombreux exercices de calcul, je rappelle, avec quelques détails, les lois fondamentales du courant électrique et de ses effets, afin que les applications des formules soient mieux saisies et que le lecteur soit en état de résoudre lui-même tous les problèmes d'Électricité; ces explications lui permettront d'employer, d'une façon sûre et intelligente, les mesures électrostatiques et électromagnétiques. J'espère avoir rempli, du moins en partie, le désir des nombreuses personnes qui m'ont demandé d'exposer les théories de l'électricité voltaïque d'après la méthode élémentaire que j'avais déjà suivie pour l'Électrostatique. Ce Livre, pour lequel j'ai compté sur le bienveillant accueil du public, est surtout destiné à la jeunesse de nos Écoles. Si quelque homme de science y jette les yeux, je lui serai reconnaissant des conseils qu'il voudra bien me donner pour améliorer autant que possible mon modeste travail. Je ne sache pas qu'aucun Ouvrage de ce genre ait été publié jusqu'à présent en Italie.

A. Serpieri.

Florence, collège La Badia, 24 septembre 1884.

TABLE DES MATIÈRES.

Pages.

AVANT-PROPOS DU TRADUCTEUR V

PRÉFACE DE L'AUTEUR VII

I. — Caractères d'un système d'unités absolues 1
II. — Équations de dimensions 6
III. — Unités mécaniques 11
IV. — Système Centimètre-Gramme-Seconde 12
V. — Densité absolue des corps 14
VI. — *Dyne;* rapport de la dyne et du gramme 16
VII. — Expression de la pression barométrique en dynes 17
VIII. — Expression en dynes de la force centrifuge à l'équateur 18
IX. — *Erg;* rapport de l'erg et du gramme-centimètre 19
X. — Erg, cheval-vapeur de 75^{kgm}, *horse-power*, etc 20
XI. — Expression de l'équivalent mécanique de la calorie-gramme en mesures absolues 21
XII. — Rapport entre les valeurs des unités dérivées de même nom, qui correspondent à des systèmes différents d'unités fondamentales 25
XIII. — Rapport des valeurs numériques d'une même grandeur rapportée à des unités différentes 26
XIV. — Unités électrostatiques 27
XV. — Rapports entre les unités électrostatiques de même nom dans les trois systèmes (C. G. S.), (millim.-milligr. S.), (mètre, G. S.) 28
XVI. — Unités électromagnétiques 30
XVII. — Rapports entre les unités électromagnétiques de même nom dans les divers systèmes 34
XVIII. — Tableau des dimensions des unités électrostatiques U. E. S. et des unités électromagnétiques U. E. M. et de leurs rapports 35
XIX. — Vitesse critique de Weber 36
XX. — Valeur numérique de cette vitesse 38
XXI. — Indice de réfraction et capacité inductive 39
XXII. — Unités électromagnétiques *pratiques* dites aussi *techniques*. 42
XXIII. — Ohm, unité technique de résistance 43
XXIV. — Ohm légal, et autres décisions du Congrès des Électriciens de 1881 44

Pages.

XXV. — Volt, unité technique de force électromotrice..... 46
XXVI. — Ampère, unité technique d'intensité de courant..... 48
XXVII. — Ampère et Weber..... 51
XXVIII. — Coulomb, unité technique de quantité..... 52
XXIX. — Farad, unité technique de capacité..... 53
XXX. — Multiples et sous-multiples des unités techniques..... 55
XXXI. — Les unités techniques dérivent d'une façon directe des unités fondamentales, « quart du méridien terrestre, $G \times 10^{-11}$, S. » 56
XXXII. — Watt, nouvelle unité technique absolue de travail, et Joule..... 58

APPLICATIONS A DIVERS PROBLÈMES.

XXXIII. — Capacité des câbles sous-marins..... 61
XXXIV. — Capacité du globe terrestre..... 62
XXXV. — Équivalents électrochimiques des divers corps pour un coulomb..... 63
XXXVI. — Unité Jacobi, $\frac{\text{Daniell}}{\text{Siemens}}$, ampère-heure..... 66
XXXVII. — Équivalent électrique, sa valeur en coulombs..... 68
XXXVIII. — Expression de l'équivalent électrique en unités électrostatiques..... 71
XXXIX. — Rapport entre l'équivalent électrique et le nombre des molécules..... 73
XL. — Travail fait par le courant..... 74
XLI. — Chaleur engendrée par le courant..... 78
XLII. — Rendement des lampes électriques..... 83
XLIII. — Rendement dans le transport de l'énergie mécanique..... 87
XLIV. — Force électromotrice nécessaire pour décomposer l'eau..... 87
XLV. — La lampe à incandescence et le Soleil..... 89
XLVI. — Force électromotrice et travail chimique de la pile..... 91
XLVII. — Origine de la force électromotrice des piles d'après la théorie du contact..... 96
XLVIII. — Résistances électriques des divers corps en mesures absolues..... 98
XLIX. — Variations principales de la résistance..... 100
L. — Expression de la résistance d'un fil en fonction de sa longueur et de son poids..... 102
LI. — Fils de bronze silicieux et phosphoreux..... 103
LII. — Section à donner aux conducteurs pour le transport de l'énergie..... 106
Tableau des rapports des unités de mesures les plus usitées. 111
Table alphabétique des matières..... 113

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DES

MESURES ABSOLUES,

MÉCANIQUES,

ÉLECTROSTATIQUES ET ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

I. — CARACTÈRES D'UN SYSTÈME D'UNITÉS ABSOLUES.

Les unités de mesure, qu'on appelle aujourd'hui *unités absolues*, se distinguent des autres unités de mesure par trois caractères principaux :

1° Quoiqu'elles représentent des grandeurs de nature distincte et sans connexité apparente, toutes les unités absolues dérivent d'une façon très simple de trois unités particulières, savoir : l'unité de longueur, l'unité de masse et l'unité de temps.

Ces unités s'appellent *unités fondamentales* et l'on donne à toutes les autres le nom d'*unités dérivées*. En raison de cette origine commune, elles forment dans leur ensemble un système bien défini, unique, dans lequel on peut considérer chaque unité dérivée comme dépendant de toutes les autres. D'ailleurs les trois unités fondamentales sont arbitraires et peuvent recevoir des valeurs différentes; suivant leurs variations, les unités dérivées changeront elles-mêmes de valeur, sans que leur mode de formation et leurs relations respectives soient modifiés. On peut ainsi constituer autant de systèmes différents que l'on adoptera de bases différentes.

2° Pour un système déterminé, les unités absolues ont partout et toujours une valeur fixe; c'est de ce caractère que vient leur nom. Considérons, par exemple, les unités non absolues,

qui servent communément à la mesure des forces et des travaux mécaniques, c'est-à-dire le poids du gramme et le gramme-mètre. La masse-gramme a un poids variable suivant la latitude : par suite, l'unité de travail a elle-même une valeur variable avec la latitude. Le même nombre de kilogrammes ou de chevaux-vapeur ne représente pas la même force ou la même quantité de travail aux divers points de la Terre. Des mesures établies avec ces unités n'ont rien d'absolu. Dans le système des unités absolues, on adopte, pour l'une des unités fondamentales, non le poids du gramme ou du kilogramme, mais leur masse, qui est la même en tout lieu, et l'inconvénient signalé disparaît.

Ainsi les unités absolues ont toujours et partout une valeur parfaitement fixe et déterminée, telle que le serait une valeur purement théorique, et dont aucune circonstance contingente ne troublerait la constance. C'est ce que M. Jenkin a fort bien exprimé dans le passage suivant de son célèbre *Rapport :*

« Par *mesure absolue,* on ne doit pas entendre une mesure exécutée avec une précision particulière, ni par *unité absolue* une unité d'une construction parfaite; en d'autres termes, en faisant usage des mots *mesures* ou *unités absolues,* on ne veut pas dire que les mesures faites ou les unités de mesure sont *absolument* parfaites, mais seulement que ces mesures, au lieu d'être établies par une simple comparaison de la quantité à mesurer avec une quantité de même espèce, sont rapportées à des unités fondamentales dont la notion est admise comme un axiome. »

3° Pour composer les unités absolues au moyen des unités fondamentales, il suffit d'élever celles-ci à certaines puissances et de former les produits; c'est ainsi, par exemple, que les unités de surface et de volume s'obtiennent en élevant au carré ou au cube l'unité de longueur. Si l'on désigne par

$$L, \quad M, \quad T$$

les trois unités fondamentales de longueur, de masse et de temps, il ne sera pas nécessaire de recourir à aucun autre symbole ni à aucun nouveau facteur pour exprimer les autres unités.

NOTE I.

DE LA MESURE EN GÉNÉRAL : UNITÉS ABSOLUES.

Mesure d'une quantité. — Quand on veut mesurer une quantité, on doit se préoccuper du choix d'une *quantité fixe* de même espèce, à laquelle on comparera toutes les autres pour en apprécier la grandeur. La quantité invariable qui sert de terme de comparaison pour les autres quantités de son espèce est appelée l'*unité*.

Chaque espèce de quantité a ainsi son unité propre, qui peut être purement conventionnelle et qui varie souvent, suivant les pays, les professions, etc.

La mesure d'une *quantité concrète* se compose essentiellement de deux termes : 1° un nom de nombre abstrait, qui indique combien de fois la quantité mesurée contient l'unité; 2° le nom de l'unité que l'on place à la suite du nombre. Ainsi l'on dit

	Nombre.	Nom de l'unité.
Une longueur de.....	25	mètres
Un poids de.....	15	grammes
Une force électromotrice de.....	20	volts

On voit aisément que le *nombre* qui représente la mesure d'une quantité concrète ne sera pas le même si l'on adopte une unité d'une grandeur différente : *le nombre qui mesure une quantité est d'autant plus grand que l'unité est plus petite et d'autant plus petit que l'unite est plus grande.*

Unités primaires et secondaires. — Afin de pouvoir représenter les quantités par des nombres de grandeur moyenne, que l'esprit saisit mieux, on a été conduit à former des *multiples de l'unité* pour mesurer les *très grandes quantités*, et *des sous-multiples de l'unité* pour mesurer les *très petites quantités*. C'est ainsi que, l'unité primitive de longueur étant le mètre, on se sert d'une unité mille fois plus grande, ou kilomètre, pour mesurer la longueur d'une route, et du centimètre ($\frac{1}{100}$ du mètre) ou du millimètre ($\frac{1}{1000}$ du mètre) pour mesurer la hauteur du mercure dans un tube barométrique.

L'unité primitivement choisie, appelée *unité primaire*, peut ainsi donner naissance, par voie de multiplication et de division, à une foule d'autres unités appelées *unités secondaires*. Celles-ci sont naturellement appropriées aux besoins de la mesure pratique.

Unités absolues. — On ne mesure pas toujours une quantité en la

comparant directement avec l'unité. La comparaison immédiate d'une grandeur avec l'unité est presque toujours difficile et même impossible. Le plus souvent, on déduit la valeur de la quantité d'une formule mathématique, qui ramène la mesure à celle d'autres quantités que l'on peut mesurer plus facilement. Citons un exemple. On démontre que la surface d'un rectangle R varie proportionnellement au produit de ses deux dimensions a et b; on a donc

$$(1) \qquad R = k(a \times b).$$

Cette équation ramène la mesure de la surface du rectangle à la mesure de deux droites. Le coefficient de proportionnalité k dépend uniquement de l'unité de surface choisie; il exprime combien de fois cette unité est comprise dans le carré ayant pour côté l'unité de longueur.

Le coefficient k interviendra dans tous les calculs relatifs aux surfaces, à moins qu'on ne s'en débarrasse une fois pour toutes *en choisissant pour unité de surface le carré ayant pour côté l'unité de longueur.*

Alors l'équation (1) donne

$$k = 1,$$

et nous avons simplement

$$(2) \qquad R = a \times b.$$

L'observation qui vient d'être faite pour l'unité de surface peut se généraliser. Si l'on considère l'ensemble des formules mathématiques au moyen desquelles on calcule les différentes quantités mécaniques et physiques, un choix convenable des unités permettra toujours de faire disparaître de ces formules les coefficients de proportionnalité, de telle sorte que la résolution numérique de l'équation donnera sur-le-champ les valeurs numériques des quantités, rapportées aux unités choisies. L'ensemble des unités ainsi déterminées d'une manière logique, d'après leurs relations mutuelles, forme ce qu'on appelle un *système cohérent d'unités* ou *système d'unités absolues.*

Utilité des unités absolues. — Le principal avantage des unités absolues consiste dans la suppression des *coefficients de proportionnalité dans le calcul numérique des quantités.*

La qualification d'*absolues* donnée à ces unités est synonyme de *rationnelles.*

On se convaincra aisément que ces unités n'ont rien de l'immutabilité qui tendrait à faire supposer leur dénomination d'unités absolues. En effet, comme le nombre des unités distinctes dont on a à faire usage dépasse celui des équations qui lient les quantités correspondantes, un

certain nombre d'unités restent entièrement arbitraires; les autres se trouvent définies en fonction de celles-là.

Unités fondamentales et unités dérivées. — En raison de l'influence qu'exerce sur l'ensemble du système le choix des unités indépendantes, on a appelé celles-ci *unités fondamentales*. Les autres unités déterminées en fonction des unités fondamentales prennent le nom d'*unités dérivées*.

On dit quelquefois qu'un système d'unités absolues est un système composé d'unités fondamentales et d'unités dérivées.

L'ensemble des unités fondamentales constitue la *base* du système. La base étant fixée d'une manière convenue, tout le système se trouve nettement défini.

Dans l'étude la plus générale de la Mécanique et de la Physique, les unités fondamentales arbitraires se réduisent à trois.

Unités fondamentales de la Mécanique. — Toutes les quantités géométriques, courbes, surfaces, volumes, se ramènent à la mesure de longueurs rectilignes. On peut regarder la notion fondamentale de *longueur* comme représentative de la notion d'*espace*.

En Mécanique, deux nouvelles notions fondamentales interviennent : le *temps*, qui entre dans l'étude des mouvements, et la *masse* qui entre dans la mesure du travail. Tous les phénomènes mécaniques, et par suite tous les phénomènes du monde physique peuvent s'exprimer en fonction de ces trois quantités : longueur, masse, temps. On peut ainsi adopter les unités de longueur, de temps et de masse pour former la base d'un système d'unités absolues.

Ce choix n'était pas *nécessaire*, et l'on pourrait prendre arbitrairement trois unités quelconques, mais les unités précédentes s'offrent, pour ainsi dire, d'elles-mêmes; elles se rapportent, en effet, à trois notions premières, dont la conception est simple et complète en soi.

Pendant longtemps, on a pris l'unité de force pour l'une des unités fondamentales. L'unité de masse devenait alors unité dérivée. Mais la notion de la force est purement hypothétique, et il est impossible de s'en faire une idée bien claire. Nous ne voyons dans le monde physique que deux choses, matière et mouvement, dont la combinaison produit l'énergie. La notion de la force ne se présente que comme une tendance des corps à produire de l'énergie, dans des circonstances données. Il est préférable de ne pas introduire ce terme dans la base d'un système absolu. Il est vrai que nous ne nous formons pas une idée plus nette de la *masse* ou *quantité de matière;* mais nous savons qu'il y a, dans un corps donné, un élément invariable comme quantité duquel dépendent les actions de gravitation, et que nous pouvons appeler la *masse du corps*, sans spécifier davantage. En un point déterminé de la

surface du globe, les masses des corps peuvent se mesurer par les poids de ces corps placés dans la balance.

Système C. G. S. — On peut former une infinité de systèmes absolus en faisant varier, soit la nature, soit la grandeur, des unités fondamentales. Chaque système particulier se désigne par les noms des trois unités de sa base. Le système qui doit servir universellement dans les mesures électriques, depuis son adoption par le Congrès de Paris, a pour base les trois unités suivantes :

1° *Unité de longueur* (centimètre). — La centième partie de la longueur de la règle en platine iridié, conservée aux Archives de Paris comme étalon du mètre;

2° *Unité de masse* (gramme). — La millième partie de la masse de 1^{kg} de platine iridié, déposée aux Archives;

3° *Unité de temps* (seconde). — La $86\,400^{e}$ partie du jour solaire moyen mesurée au moyen d'une bonne horloge, corrigée d'après les observations astronomiques.

Le système *centimètre-gramme-seconde* se représente en abrégé par les initiales C. G. S.

Étalons fondamentaux. — Quelles que puissent être les conditions théoriques qui ont guidé dans la détermination de la grandeur des unités fondamentales, ces unités ne doivent plus, après leur adoption, être sujettes à aucune correction ultérieure. C'est pourquoi il y a lieu de les représenter par des étalons matériels; on ne doit plus les définir que comme étant adéquates à ces étalons conservés soigneusement à l'abri de toutes causes d'altération.

Étalons dérivés. — Bien que toutes les mesures puissent se ramener, en principe, à la mesure d'une ou de plusieurs des quantités fondamentales, il est utile de posséder des étalons matériels des unités dérivées pour s'en servir dans les cas nombreux où la comparaison directe est possible.

En mesure électrique, on se sert fréquemment des étalons de force électromotrice, de capacité et de résistance. P. M.

II. — ÉQUATIONS DE DIMENSION.

On appelle *équations de dimension* les expressions qui représentent les diverses unités dérivées en fonction des unités fondamentales L, M, T.

Supposons entre une grandeur quelconque G et les grandeurs A, B, C la relation

$$G = A^{\alpha} B^{\beta} C^{\gamma}.$$

Si, pour donner une signification à cette formule, on attribue à A, B, C des valeurs numériques, celles-ci ne sont autre chose que les rapports des grandeurs A, B, C à leurs unités de mesure a, b, c; par suite, le second membre devient

$$\left(\frac{A}{a}\right)^{\alpha}\left(\frac{B}{b}\right)^{\beta}\left(\frac{C}{c}\right)^{\gamma}:$$

ce produit représentera le quotient de la grandeur G par son unité de mesure g. Quelle est cette unité? Lorsque A, B, C sont respectivement égaux à a, b, c, le second membre est égal à 1; par suite,

$$G = 1 = g.$$

Supposons que nous connaissions la forme de la fonction de longueur, de masse et de temps qui représente une grandeur dérivée; nous pourrons représenter sous la même forme l'unité de la grandeur dérivée en fonction des unités de ces mêmes éléments, que nous désignerons désormais par L, M, T.

On a donné aux équations de cette nature et de la forme générale

$$[u] = [L^{\alpha}M^{\beta}T^{\gamma}]T^{\gamma}$$

le nom d'*équations de dimension*, parce qu'elles montrent d'une façon très simple que l'unité $[u]$ varie suivant les degrés α de L, β de M et γ de T.

Ces équations fournissent immédiatement le rapport des valeurs que prennent les unités dérivées, si l'on change la valeur des bases. Il est clair que, si les unités a, b, c deviennent m, n, p fois plus grandes, l'unité g qui en dérive deviendra

$$m^{\alpha} \times n^{\beta} \times p^{\gamma}$$

fois plus grande : pour obtenir la nouvelle valeur de l'unité $[u]$ quand les unités L, M et T deviennent m, n et p fois plus grandes, il suffit de connaître l'équation de dimension qui exprime $[u]$ en fonction de L, M, T.

NOTE II.

DIMENSIONS DES UNITÉS.

Équations de dimension. — Considérons une quantité physique ou mécanique Q dont la valeur est donnée par l'équation

$$Q = f(a, b, c, \ldots), \tag{1}$$

dans laquelle $a, b, c, \ldots$ sont des quantités géométriques, mécaniques ou physiques.

Si nous remplaçons chacune des quantités $a, b, c, \ldots$ par un symbole convenu *représentatif de sa nature,* indépendamment de toute considération de grandeur, nous obtiendrons l'expression des *dimensions* de la quantité Q, et l'équation (1) deviendra une *équation de dimension.*

Représentons les quantités fondamentales, *longueur, masse, temps* par les symboles respectifs

$$[L], [M], [T].$$

Toutes les quantités mécaniques ou physiques pouvant s'exprimer en fonction de ces trois quantités fondamentales, les dimensions de la quantité Q pourront être ramenées à ne renfermer en dernière analyse que certaines puissances des symboles [L], [M], [T].

Ainsi, une surface s'exprime par le produit de deux lignes, à une constante près,

$$S = a \times b.$$

Si l'on prend, pour représenter la surface, le symbole [S], on obtiendra l'équation de dimension

$$[S] = [L^2].$$

Un volume étant en général le produit de trois lignes, on pourra écrire d'une manière analogue

$$[V] = [L^3].$$

Il est d'usage de placer entre crochets les lettres symboliques qui entrent dans les équations de dimension.

Passant aux quantités mécaniques, on trouve que les dimensions de la vitesse sont

$$[r] = [LT^{-1}],$$

celles de l'accélération

$$[\gamma] = [\rho T^{-1}] = [LT^{-2}],$$

celles de la force

$$[F] = [M\gamma] = [LMT^{-2}],$$

celles du travail

$$[W] = [FL] = [L^2MT^{-2}].$$

En général, une quantité Q a pour dimensions

$$(2) \qquad [Q] = [L^\alpha M^\beta T^\gamma],$$

et l'on dit alors que les dimensions de Q sont α par rapport à L, β par rapport à M et γ par rapport à T.

Usages des équations de dimension. — Les équations de dimension servent à trois usages :

1° *Vérification des calculs par l'homogénéité.* — Les équations de dimension, pour être exactes, doivent être homogènes, c'est-à-dire que si le symbole L, par exemple, se trouve dans un membre avec un exposant α, il doit se trouver dans le second membre avec le même exposant : si l'un des membres représente symboliquement une vitesse, un travail, un potentiel, etc., le second membre doit avoir la même signification. L'homogénéité des équations de dimension est une conséquence de l'homogénéité des équations fondamentales de la Mécanique. Si, après une longue série de calculs, on transforme l'équation finale en équation de dimension, et si l'homogénéité est satisfaite, cela prouve en faveur de l'exactitude des opérations; au contraire, s'il y a hétérogénéité, on peut affirmer qu'une erreur a été commise dans la suite des transformations.

2° *Variations des unités.* — L'unité d'une certaine espèce de grandeur a naturellement les mêmes dimensions que cette grandeur en général. L'équation de dimension d'une unité fait connaître l'influence qu'exerce sur la grandeur de cette unité la variation de la grandeur des unités fondamentales.

Ainsi, l'unité de surface étant de la deuxième dimension par rapport à l'unité de longueur

$$[S] = [L^2],$$

il est clair que, si l'unité de longueur devient dix fois plus grande que L, le carré ayant pour côté l'unité de longueur, qui représente la nouvelle unité de surface, se trouvera 10^2 ou 100 fois plus grand que l'unité primitive.

En général, soit

$$(3) \qquad [u] = [L^\alpha M^\beta T^\gamma]$$

l'équation de dimension d'une unité u.

Si l'on vient à changer les unités fondamentales et à substituer à L, M, T les nouvelles unités L', M', T' égales à mL, nM, pT, la valeur de l'unité $[u]$ devient u', et l'équation de dimension (3) donne la valeur de u'

$$u' = u \times m^{\alpha} \times n^{\beta} \times p^{\gamma} \tag{4}$$

ou bien

$$u' = u \times \left(\frac{L'}{L}\right)^{\alpha} \times \left(\frac{M'}{M}\right)^{\beta} \times \left(\frac{T'}{T}\right)^{\gamma}. \tag{4 bis}$$

RÈGLE. — *Étant donnée l'unité d'une quantité dans un certain système absolu, pour trouver la valeur de l'unité dans un nouveau système obtenu en modifiant les grandeurs des unités fondamentales, il faut multiplier l'ancienne unité par le rapport de chacune des nouvelles unités fondamentales à l'ancienne unité correspondante, élevé à une puissance marquée par l'exposant du symbole de l'unité fondamentale considérée dans l'équation des dimensions.*

3° *Variation du nombre qui représente une même quantité dans différents systèmes d'unités.* — Soit Q une quantité concrète qui est représentée par le nombre q, par rapport à l'unité [Q]. On a

$$Q = q[Q].$$

Si l'on rapporte la même quantité Q à une nouvelle unité [Q'], le nombre q devient q', et l'on doit avoir

$$q[Q] = q'[Q'];$$

d'où

$$\frac{q}{q'} = \frac{[Q']}{[Q]}. \tag{5}$$

Le nombre abstrait qui mesure une quantité varie en raison inverse de l'unité qui sert de terme de comparaison.

D'après cela, étant donnée la mesure d'une quantité dans un système d'unités, il est facile de trouver le nombre qui représentera la même quantité dans un système différent. On cherchera d'abord ce que devient l'unité, quand on passe du premier système au second; puis on cherchera ce que devient le nombre d'après l'équation (5). Supposons que la quantité Q soit de la deuxième dimension par rapport à L. Si l'unité de longueur devient dix fois plus grande, l'unité de Q deviendra cent fois plus grande, et le nombre qui mesure Q deviendra cent fois plus petit.

En général, soient

$$[Q] = [L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma}]$$

les dimensions de la quantité Q,

$$L,\ M,\ T$$

les unités fondamentales du premier système,

$$L',\ M',\ T'$$

les unités fondamentales du second système; la mesure de Q sera

$$q[Q]$$

dans le premier système,

$$q'[Q']$$

dans le second système. On aura

$$[Q'] = [Q] \times \left(\frac{L'}{L}\right)^{\alpha} \times \left(\frac{M'}{M}\right)^{\beta} \times \left(\frac{T'}{T}\right)^{\gamma}$$

et

$$q' = q \times \left(\frac{L'}{L}\right)^{-\alpha} \times \left(\frac{M'}{M}\right)^{-\beta} \times \left(\frac{T'}{T}\right)^{-\gamma}.$$

RÈGLE. — *Ayant la mesure d'une quantité dans un certain système d'unités, pour trouver le nombre représentatif de la quantité dans un nouveau système obtenu en changeant la grandeur d'une ou de plusieurs des unités fondamentales, il faut multiplier l'ancien nombre par le rapport de chacune des nouvelles unités fondamentales à l'ancienne, élevé à une puissance marquée par l'*exposant pris en signe contraire *du symbole de l'unité fondamentale considérée dans les dimensions de la quantité.* P. M.

III. — UNITÉS MÉCANIQUES.

VITESSE [v]. — Dans le mouvement uniforme, l'expression de la vitesse est

$$v = \frac{s}{t},$$

et, dans le mouvement varié, en appelant ds un espace infiniment petit, parcouru dans un temps dt, on a

$$v = \frac{ds}{dt}.$$

La vitesse est donc toujours exprimée par le rapport entre un espace et un temps. Conformément à ce qui a été dit plus

haut, l'unité de vitesse dans le système absolu sera le rapport simple des unités fondamentales L, T, et nous aurons, pour son équation de dimension,

$$[v] = [LT^{-1}].$$

ACCÉLÉRATION $[\gamma]$. — L'accélération se mesure à chaque instant t par le rapport entre l'accroissement dv de la vitesse et l'accroissement dt du temps quand ce dernier accroissement devient infiniment petit. On a donc

$$\gamma = \frac{dv}{dt},$$

où le second membre exprime un rapport entre une vitesse et un temps. On composera donc la formule de l'unité d'accélération en divisant l'unité de vitesse $[v]$ par l'unité de temps T

$$[\gamma] = [LT^{-2}].$$

FORCE $[f]$. — Une force est proportionnelle à l'accélération qu'elle produit et à la masse sur laquelle elle s'exerce. C'est pour cette raison qu'on prend pour mesure de la force le produit de la masse par l'accélération. Pour exprimer l'unité de force, on n'aura qu'à multiplier l'unité d'accélération $[\gamma]$ par l'unité de masse M : on obtient ainsi

$$[f] = [LMT^{-2}].$$

TRAVAIL [W]. — Le travail est le produit d'une force par la distance qu'elle fait parcourir à son point d'application. Dans le système absolu, on obtiendra donc l'unité de travail en multipliant l'unité de force $[f]$ par l'unité de longueur L : on trouve ainsi

$$[W] = [L^2MT^{-2}].$$

IV. — SYSTÈME CENTIMÈTRE-GRAMME-SECONDE.

Les mesures absolues ont été introduites dans la Science par les illustres physiciens Gauss et Weber. Ils avaient choisi

pour unités fondamentales le millimètre, le milligramme et la seconde. L'Association britannique adopta, au contraire, le mètre, le gramme, la seconde; mais, depuis 1875, elle avait remplacé le mètre par le centimètre.

Ce système, qu'on représente par un symbole formé des initiales des unités choisies

C.G.S.,

est devenu universel à la suite des délibérations du Congrès international des électriciens, tenu à Paris en septembre 1881 : il a été préféré au système mètre-gramme-seconde pour une raison que nous indiquerons plus loin.

Dès à présent, nous devons définir exactement les valeurs des trois unités C.G.S.

Le centimètre est la centième partie du mètre, étalon conservé dans les Archives de Paris.

La seconde est la 86400e partie de la durée du jour moyen, durée qui n'a pas varié depuis plusieurs siècles.

Quant au mot *gramme* qui désigne ici, non un poids, mais une masse, il faut bien se rappeler qu'il ne signifie pas, suivant la définition théorique, la masse de 1cc d'eau distillée, à 4°, mais la millième partie de la masse du kilogramme étalon, conservée également à Paris.

Les définitions théoriques du gramme et du mètre sont, comme on le voit, sans importance pour nous, et nous fixons leurs valeurs d'après les échantillons conservés dans les Archives.

Ajoutons que 1cc d'eau à 4° contient un peu plus de matière que la millième partie du kilogramme des Archives et équivaut à 1,000013 masse-gramme [1].

Assurément ce coefficient peut être pris pour 1 dans les calculs où l'on ne pousse pas l'approximation au delà de la qua-

---

[1] Valeur déterminée par Kupffer et réduite par Miller (EVERETT, *Unités et constantes physiques*, Londres, 1879 : traduction française de J. Raynaud, 1883, p. 32, § 34).

Les nouvelles déterminations de l'aplatissement du globe donnent une valeur de 10 000 856 mètres au quart de l'ellipse méridienne.

trième ou cinquième décimale, mais la différence entre ce coefficient et l'unité montre que la définition théorique du gramme ne saurait être adoptée par nous.

V. — DENSITÉ ABSOLUE DES CORPS.

La densité absolue d'un corps est déterminée par la quantité de matière contenue sous l'unité de volume. — Dans le système C. G. S., où l'unité de volume est le centimètre cube, la densité absolue de l'eau sera exprimée par 1,000013 masse-gramme; on peut, dans les calculs ordinaires, considérer cette quantité comme égale à 1.

Dans le système absolu qui a pour unités fondamentales le mètre, le gramme et la seconde, l'unité de volume est le mètre cube, et la densité absolue de l'eau devient 1000013 masses-gramme; car on a le rapport

$$D = \frac{M}{v} = \frac{1,000013}{(0^m,01)^3}.$$

Tandis que, dans le système C. G. S., les densités absolues des divers corps restent *pratiquement* égales à leurs poids spécifiques, c'est-à-dire au rapport de leurs densités à celle de l'eau, on devra, dans l'autre système, multiplier par 1000013 tous les poids spécifiques déjà déterminés pour avoir la valeur des densités absolues des divers corps. Les poids spécifiques fournis par les Tables peuvent être considérés comme les densités absolues, si l'on adopte le système C. G. S. de préférence à l'autre, dans lequel le mètre remplace le centimètre.

APPLICATIONS.

a. — Densité de la vapeur d'eau.

Depuis les dernières corrections de Lasch et de Kohlrausch [1], les Tables usuelles donnent, pour les densités de

---

[1] Voir le *Manuel de Physique* des professeurs Maccari et Bellati, p. 585, 669.

l'air, de l'oxygène et de l'hydrogène comparées à celle de l'eau, les valeurs suivantes :

Air	0,001292756
Oxygène	0,001429310
Hydrogène	0,000089547

Ces nombres se rapportent à une pression de 760^{mm}, à la latitude 45° et au niveau de la mer; pour en déduire les densités absolues dans les mêmes conditions, il faut les multiplier par 1,000013, comme nous l'avons expliqué plus haut; on obtient alors :

	Densité absolue, à la pression 760^{mm}, à la latitude 45° et au niveau de la mer.
Air	0,001292773
Oxygène	0,001429329
Hydrogène	0,000089548

Dans la combinaison de 2^{cc} d'hydrogène et de 1^{cc} d'oxygène qui donne 2^{cc} de vapeur d'eau, il entre ainsi une quantité de matière égale à

0,001608425 masse-gramme.

La moitié de ce nombre représente la masse contenue dans 1^{cc}, c'est-à-dire la densité absolue de la vapeur d'eau : celle-ci a donc pour valeur

0,000804212,

nombre qui, divisé par la densité absolue de l'air, donne le rapport

$$\frac{\text{densité absolue de la vapeur d'eau}}{\text{densité absolue de l'air}} = 0{,}622,$$

pour le poids spécifique de la vapeur d'eau comparée à l'air.

b. — Volumes de la masse-gramme des divers gaz à la latitude de 45° et au niveau de la mer, sous la pression de 760^{mm}.

Si l'on connaît la fraction de masse-gramme que contient 1^{cc} d'un gaz, une simple proportion donnera le volume de ce gaz

qui contient la masse de 1^{gr}. Nous obtenons ainsi, pour les gaz déjà cités :

	Volume de 1 masse-gramme, sous la pression de 760^{mm}, à la latitude 45° et au niveau de la mer.
	cc
Air	773,53
Oxygène	699,63
Hydrogène	11167,20
Vapeur d'eau	1243,45

VI. — DYNE : RAPPORT DE LA DYNE ET DU GRAMME.

L'unité de force $[LMT^{-2}]$, dans le système absolu C.G.S., s'appelle *dyne* (¹).

D'après sa définition, *la dyne est la force qui, agissant sur la masse-gramme, lui imprime une accélération d'un centimètre par seconde;* ou bien encore *la dyne est la force qui, agissant sur la masse-gramme pendant une seconde, lui imprime une vitesse d'un centimètre.*

A la latitude de 45° et au niveau de la mer, le poids de 1^{gr} produit par seconde l'accélération $g = 9^{m},8061$. Nous pourrons donc poser

$$1^{gr} = 980,61 \text{ dynes};$$

d'où

$$1 \text{ dyne} = \frac{1^{gr}}{980,61} = 0^{gr},0010198$$

ou

$$\text{un million de dynes ou } \textit{mégadyne} = 1020^{gr},$$

force un peu supérieure au poids de *un* kilogramme.

Pour avoir les valeurs exactes de ces rapports sous une latitude quelconque λ et à une hauteur quelconque h au-dessus du niveau de la mer, il faut recourir à la formule suivante,

---

(¹) Ce terme, employé d'abord par les Anglais, vient du mot grec δύναμις (force). Suivant le Comité anglais, « le terme *dynamie* satisferait davantage les étymologistes.....; mais l'abréviation *dyne*, bien que peu conforme aux lois strictes de l'étymologie, obtiendra probablement la préférence en Angleterre. »

dans laquelle l'accélération produite par la pesanteur est exprimée en centimètres,

$$g^c = 980{,}6056 - 2{,}5028 \cos 2\lambda - 0{,}000003\,h.$$

Cette formule est adoptée par MM. Everett, Jamin, Pellat, etc.

A cette valeur de g^c se rapportent les expressions générales

$$1 \text{ dyne} = \frac{1^{gr}}{g^c},$$

$$1^{gr} = g^c \text{ dynes}.$$

Suivant la valeur de g, il faut donc un nombre plus ou moins grand de dynes pour soulever la masse-gramme; on trouve, par exemple, que le poids de

	Dynes.
1 gramme au pôle.....	= 983,11
» à Berlin (52°30').....	= 981,25
» à Greenwich (51°29').....	= 981,17
» à Paris (48°50').....	= 980,94
» à l'équateur.....	= 978,10

En appliquant l'unité de force à une masse de m grammes, on aurait, après une seconde, une vitesse égale à

$$\frac{1^c}{m}, \quad \text{d'où} \quad m \times \text{vitesse} = 1.$$

La dyne est donc la force qui, agissant pendant 1^s, sur une masse quelconque, produit la quantité 1 de mouvement.

Quelques applications familiariseront le lecteur avec cette unité de force.

VII. — EXPRESSION DE LA PRESSION BAROMÉTRIQUE EN DYNES.

Le poids spécifique du mercure à 0° est 13,596, par rapport à l'eau prise à son maximum de densité. Ce nombre marque la densité absolue du mercure, si l'on admet que l'eau contenue dans 1^{cc} a la masse d'*un* gramme. Mais, si l'on veut faire un

calcul exact, on aura, pour la masse de 1^{cc} de mercure, la valeur (§ IV)

$$13{,}596 \times 1{,}000013 = 13{,}5962 \text{ masses-gramme,}$$

et une colonne de 760^{mm} de hauteur et de 1^{cq} de base contiendra

$$1033{,}3 \text{ masses-gramme;}$$

la pression exercée par elle sera, par conséquent,

$$1033{,}3 \times g^c \text{ dynes;}$$

elle vaut

	Dynes.
A Paris	$1{,}0136 \times 10^6$
A la latitude de 45°.....	$1{,}0133 \times 10^6$
A l'équateur.....	$1{,}0007 \times 10^6$

c'est-à-dire partout un peu plus d'une *mégadyne* (§ V).

C'est à tort que l'on appelle *pression normale* la pression correspondant à une colonne de mercure de 760^{mm}, puisque le poids de cette colonne varie avec la latitude; M. Everett avait proposé de prendre la mégadyne pour étalon de la pression d'une atmosphère sur 1^{cq}; mais cette proposition n'a pas été accueillie jusqu'à présent. A Paris, la mégadyne correspond à la pression barométrique de $74^{cm},98$.

VIII. — EXPRESSION EN DYNES DE LA FORCE CENTRIFUGE A L'ÉQUATEUR.

La formule connue

$$f = m\frac{v^2}{r},$$

qui détermine la valeur de la force centrifuge, se ramène, si l'on appelle t la durée d'une révolution complète, à

$$f = \frac{m}{r}\left(\frac{2\pi r}{t}\right)^2 = mr\left(\frac{2\pi}{t}\right)^2.$$

Posons dans cette formule, pour l'appliquer à la Terre,

$$r = 6{,}38 \times 10^8 \text{ centimètres}$$

et

$$t = 86164 \text{ secondes},$$

il en résulte, en prenant pour m la masse-gramme,

$$f = 3{,}39 \text{ dynes}.$$

Ainsi la valeur de g^c à l'équateur serait, sans la force centrifuge,

$$978{,}10 + 3{,}39 = 981{,}49 \text{ dynes}.$$

IX. — ERG : RAPPORT DE L'ERG ET DU GRAMME-CENTIMÈTRE OU DU KILOGRAMMÈTRE.

L'unité absolue du travail $[L^2 M T^{-2}]$ dans le système C. G. S. a été appelée *erg* par les Anglais; aujourd'hui ce nom est à peu près universellement adopté. Le mot *erg* est une abréviation du mot grec ἔργον, qui signifie *œuvre, travail, énergie.*

L'erg est le travail accompli par une dyne, quand elle fait parcourir à son point d'application une distance d'un centimètre.

Lorsque la masse-gramme tombe d'une hauteur de 1^{cm} sous l'action de la pesanteur ou de g^c dynes ou gramme-centimètre, le travail accompli est g^c ergs. De là les relations suivantes :

En général,

1 gramme-centimètre.....	$= g^c$ ergs
1 erg.....	$= \frac{1^{grc}}{g^c}$
1 kilogrammètre.....	$= g^c \times 10^5$ ergs
1 erg.....	$= \frac{1^{kgm}}{g^c \times 10^5}$

A la latitude 45° et au niveau de la mer,

1 gramme-centimètre.....	$= 980{,}61$ ergs
1 erg $= \frac{1^{gr.c}}{980{,}61}$	$= \frac{102}{10^5}$ gr. cent.
1 kilogrammètre.....	$= 980{,}61 \times 10^5$ ergs
1 erg $= \frac{1^{kgm}}{980{,}61 \times 10^5}$	$= \frac{102}{10^{10}}$ kilogrammètres

Les Anglais emploient fréquemment l'unité de travail *pied-livre*, qu'ils appellent *foot-pound*. Le pied anglais vaut $0^{m},3048$ et la livre $0^{kg},4536$.

Le *foot-pound* est égal à

$$0,3048 \times 0,4536^{kgm} = 0^{kgm},13826.$$

En admettant que, à la latitude de Greenwich,

$$1^{kgm} = 981,17 \times 10^{5} \text{ ergs},$$

on aura, pour un foot-pound,

$$0,13826 \times 981,17 \times 10^{5} \text{ ergs} = 135,66 \times 10^{5} \text{ ergs}.$$

X. — ERG, CHEVAL-VAPEUR DE 75^{kgm}, HORSE-POWER, ETC.

a. Suivant la mesure française, adoptée en Italie, le cheval-vapeur vaut 75^{kgm} par seconde, et l'on dit qu'une machine est de la force de 10 chevaux si elle accomplit un travail de 750^{kgm} en une seconde.

On aura donc :

En général,

$$1 \text{ cheval-vapeur} \ldots\ldots = g^{c} \times 10^{5} \times 75 \text{ ergs}$$
$$1 \text{ erg} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots = \frac{1}{g^{c} \times 10^{5} \times 75} \text{ chev.-vap.}$$

A la latitude de 45° et au niveau de la mer,

$$1 \text{ cheval-vapeur} \ldots\ldots\ldots\ldots = 735,46 \times 10^{7} \text{ ergs}$$
$$1 \text{ erg} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots = \frac{136}{10^{12}} \text{ chev.-vap.}$$

A la latitude de Greenwich (d'après les Ouvrages anglais),

$$\text{Le cheval-vapeur de } 75^{kgm} \ldots\ldots = 736 \times 10^{7} \text{ ergs}$$

b. *Horse-power* ou *cheval-force, cheval-vapeur anglais*. — Cette unité de travail vaut 550 pieds-livres (foot-pound) par seconde, c'est-à-dire (§ IX)

$$550 \times 0,13826 = 76 \text{ kilogrammètres};$$

d'où

1 horse-power ..... $= 746 \times 10^7$ ergs

1 erg..... $= \frac{134}{10^{12}}$ horse-power

Le rapport exact entre le cheval français et l'*horse-power* est, d'après Gordon et Schellen,

1 horse-power (H.-P.) = 1,0139 cheval français.

c. H.-D. Schellen (1) donne, pour la valeur du cheval-vapeur usité,

En Prusse..... $738,9 \times 10^7$ ergs
En Autriche..... $746,7 \times 10^7$ ergs

XI. — EXPRESSION DE L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CALORIE-GRAMME EN MESURES ABSOLUES (2).

Aujourd'hui tous les physiciens ont adopté, pour l'*équivalent mécanique de la calorie-gramme* exprimé en unités simples absolues, la valeur

$$J = 4,2 \times 10^7 \text{ ergs}$$

ou 42 millions d'ergs. Ce nombre, converti en kilogrammètres au moyen des coefficients du paragraphe précédent, vaut

$$4,2 \times 10^7 \times \frac{102}{10^{10}} = \frac{428,4}{10^3} \text{ kgm.}$$

Par suite, la calorie-kilogramme a pour équivalent mécanique $428^{kgm},4$.

Ce nombre, supérieur au nombre 425^{kgm} généralement adopté, est considéré par beaucoup de savants comme plus exact (3).

---

(1) H. Schellen, *Les machines magn. et dynamo-élect.*, 3e édit., p. 69.

(2) En l'honneur de Joule, M. Paul de Saint-Robert, dans son ouvrage classique : *Principes de Thermodynamique* (Turin, Zœscher, 1870, p. 46), avait désigné par J l'équivalent mécanique de la *calorie-kilogramme* : M. Everett représente aujourd'hui par J l'équivalent mécanique de la *calorie-gramme*, et nous adoptons cette notation dans le présent Traité.

(3) Everett, *Œuvres citées*, § 139. — Hirn, *Exposition de la Théorie mécanique de la chaleur*, t. I, § 4; 1875.

De la valeur de J nous tirons les équivalences suivantes :

$$1 \text{ erg} = \frac{1}{4{,}2 \times 10^7} = \frac{24}{10^9} \text{ calorie-gramme}$$

ou

$$1 \text{ erg} = \frac{24}{10^{12}} \text{ calorie-kilogramme.}$$

On prend parfois pour unité de mesure de la chaleur la quantité de chaleur représentée par $\frac{24}{10^9}$ calorie-gramme ou par $\frac{24}{10^{12}}$ calorie-kilogramme; dans ce cas, les formules qui donnent les valeurs de l'énergie mécanique fournissent, sans le secours d'aucun coefficient, les valeurs de l'énergie calorifique. Si, par exemple, on a pour un travail

$$W = 100 \text{ ergs,}$$

la chaleur correspondant à ce travail sera

$$C = 100 \text{ unités,}$$

et l'on pourra remplacer W par C. Mais ces 100 unités thermiques, au lieu d'être 100 calories, sont 100 fractions de calorie, c'est-à-dire

$$100 \times \frac{24}{10^9} \text{ calorie-gramme}$$

ou

$$100 \times \frac{24}{10^{12}} \text{ calorie-kilogramme.}$$

APPLICATIONS.

a. — Énergie mécanique de quelques combustions.

1gr *de charbon produit, en se combinant complètement avec l'oxygène* (CO^2), 8000 *calories-gramme, dites calories de combustion; c'est ce nombre que l'on prend pour mesure du* pouvoir calorifique *du charbon.*

Quel sera le pouvoir mécanique équivalent à ce pouvoir calorifique?

On a évidemment

$$8000 \times 4{,}2 \times 10^7 \text{ ergs}$$
$$= 8000 \times 4{,}2 \times \frac{102}{10^3} \text{ kgm} = 3427 \text{ kgm}$$
$$= 8000 \times 4{,}2 \times 10^7 \times \frac{136}{10^{12}} \text{ chev.-vap.} = 45{,}7 \text{ chev.-vap.}$$

Ainsi, pour créer un travail disponible d'un cheval-vapeur par seconde, il devrait suffire de brûler $\frac{1^{gr}}{45{,}7}$ de charbon par seconde; et, pour 1 cheval-vapeur pendant toute la durée d'une heure, la dépense en charbon devrait être

$$\frac{1}{45{,}7} \times 60^2 = 78^{gr}{,}77.$$

On sait que, dans les meilleures machines à vapeur, il faut

1^{kg} de charbon par cheval et par heure;

d'où il résulte que l'on utilise à peine 0,08 du travail produit.

On trouve de la même manière, pour la combinaison de 1^{gr} d'hydrogène avec l'oxygène (HO),

$$34000 \times 4{,}2 \times 10^7 \text{ ergs} = 194 \text{ chevaux-vapeur},$$

et, pour celle de 1^{gr} de zinc avec l'oxygène,

$$1301 \times 4{,}2 \times 10^7 \text{ ergs} = 7{,}4 \text{ chevaux-vapeur}.$$

b. — Calcul de force vive et chaleur équivalente.

Si une balle de plomb de m grammes, animée d'une vitesse de 500^m *par seconde, vient frapper un obstacle fixe, pourrait-elle être fondue par la chaleur produite?*

Nous supposerons que la température primitive de la balle était 10°.

On sait que le point de fusion du plomb est 322°, que sa

chaleur latente de fusion est $5^{cal},4$ et que sa chaleur spécifique moyenne à 150° est, suivant Bède [1],

$$0,0283 + 0,000036 \times t = 0^{cal},0337.$$

Pour fondre la balle, il faudra donc un nombre de calories-gramme

$$m(312 \times 0,0337 + 5,4) = m \times 15,9.$$

A la vitesse de 500^{m}, la force vive ou le travail produit est

$$\tfrac{1}{2} m (50000)^2 \text{ ergs},$$

et ce travail vaut, en calories-gramme,

$$\tfrac{1}{2} m (50000)^2 \frac{24}{10^9} = m \times 30 \text{ calories-gramme}.$$

Ainsi donc ce n'est pas une seule balle, mais deux balles que pourrait fondre la chaleur totale développée par le brusque arrêt d'une seule.

c. — Chaleur spécifique des gaz à pression constante et à volume constant.

Supposons qu'on ait renfermé 1^{gr} d'air sec et 1^{gr} d'hydrogène à la pression de 760^{mm} dans deux vases cylindriques de 1^{cq} de base, de façon que ces masses gazeuses occupent les volumes indiqués § V (*b*), et calculons le travail effectué par ces gaz et son équivalent thermique, lorsqu'ils sont échauffés de 1° et se dilatent à la pression constante de 760^{mm} en poussant, par exemple, un léger piston.

En introduisant dans le calcul la pression atmosphérique qui, à la latitude de 45°, vaut, en mesure absolue (§ VII),

$$1,0133 \times 10^6 \text{ dynes},$$

les coefficients de dilatation qui sont, d'après Regnault,

Pour l'air.....	0,0036706
Pour l'hydrogène.....	0,0036613

---

(1) Everett, *Opere citato*, § 104.

et les volumes précédemment indiqués, on trouve, pour les travaux effectués dans les deux vases,

$$1,0133 \times 10^6 \times 0,0036706 \times 773,53 = 2,8771 \times 10^6 \text{ ergs},$$
$$1,0133 \times 10^6 \times 0,0036613 \times 11167,20 = 41,4303 \times 10^6 \text{ ergs}.$$

Ces travaux emploient une quantité de chaleur de $\frac{24}{10^9}$ calorie-gramme par erg, c'est-à-dire

$$2,8771 \times 10^6 \times \frac{24}{10^9} = 0,06905 \text{ calorie-gramme}.$$

$$41,4303 \times 10^6 \times \frac{24}{10^9} = 0,99433 \text{ calorie-gramme}.$$

Or ces quantités de chaleur représentent l'excès que la chaleur spécifique des deux gaz sous pression constante doit avoir sur la chaleur spécifique de ces mêmes gaz à volume constant; car aucune quantité de chaleur ne doit être dépensée en travail, quand le volume demeure constant.

On a donc

	Air	Hydrogène.
Chaleur spécifique à pression constante,	0,2377	3,4090
d'après Regnault.....	—0,0690	—0,9943
Chaleur spécifique à volume constant.	0,1687	2,4147

Entre les deux chaleurs respectives se retrouve le rapport constant 1,41.

XII. — RAPPORT ENTRE LES VALEURS DES UNITÉS DÉRIVÉES DE MÊME NOM QUI CORRESPONDENT A DES SYSTÈMES DIFFÉRENTS D'UNITÉS FONDAMENTALES.

Comme on l'a dit au § II, les équations de dimension fournissent les valeurs des unités dérivées qui correspondent à diverses valeurs des unités fondamentales. Pour obtenir le rapport des unités $[u_1]$ et $[u]$, on s'appuiera sur l'expression suivante

$$\frac{[u_1]}{[u]} = \left(\frac{L_1}{L}\right)^\alpha \left(\frac{M_1}{M}\right)^\beta \left(\frac{T_1}{T}\right)^\gamma,$$

dans laquelle on remplacera au second membre les quotients des unités de même nom par les nombres exprimant les rapports des nouvelles unités fondamentales aux unités primitives.

Donnons quelques exemples en nous servant des formules établies par les unités mécaniques :

a. Pour l'unité de force, on a

$$[f] = [\mathrm{LMT}^{-2}].$$

Si l'on désigne par $[f]$ l'unité de force du système C. G. S., les unités de force des autres systèmes seront exprimées par

Système.	
Millim.-milligr.-S.....	$[f_1] = \frac{1}{10^4}[f] = \frac{1 \text{ dyne}}{10^4} = 0^{gr},000010198$
Mètre-G.-S.....	$[f_1] = 100\,[f] = 100 \text{ dynes} = 0^{gr},10198$
Mètre-Kg.-S.....	$[f_1] = 10^5\,[f] = 10^5 \text{ dynes} = 102^{gr}$

b. Pour l'unité de travail, on a

$$[\mathrm{W}] = [\mathrm{L}^2\mathrm{MT}^{-2}].$$

Comparativement à l'unité [W] de travail du système C.G.S., les unités de travail des divers systèmes seront :

Système.	
Millim.-milligr.-S.....	$[\mathrm{W}^1] = \frac{1}{10^5}[\mathrm{W}]$
	$= \frac{1 \text{ erg}}{10^5} = \frac{102}{10^{10}}$ gr. centim.
Mètre-G.-S.....	$[\mathrm{W}^1] = 10^4\,[\mathrm{W}]$
	$= 10^4$ ergs $= 10,2$ gr. centim.
Mètre-Kg.-S.....	$[\mathrm{W}^1] = 10^7\,[\mathrm{W}]$
	$= 10^7$ ergs $= 10200$ gr. centim.
	$= 0,102$ kgm.

XIII. — RAPPORT DES VALEURS NUMÉRIQUES D'UNE MÊME GRANDEUR RAPPORTÉE A DES UNITÉS DIFFÉRENTES.

Si une grandeur est mesurée avec des unités de valeur différente $[u_1]$ et $[u]$, elle s'exprime nécessairement par des

nombres différents N′ et N : dans tous les cas, on a

$$N'[u_1] = N[u]$$

et, par conséquent,

$$\frac{N'}{N} = \frac{[u]}{[u_1]}.$$

Ainsi *les valeurs numériques d'une même grandeur sont en raison inverse des valeurs des unités auxquelles elle est rapportée.*

XIV. — UNITÉS ÉLECTROSTATIQUES.

Pour désigner les *unités électrostatiques,* nous emploierons toujours des lettres *minuscules* entre parenthèses.

QUANTITÉ ÉLECTRIQUE $[q]$. — D'après la loi de Coulomb, on trouve entre les quantités égales q agissant l'une sur l'autre à la distance l la force

$$f = \frac{q^2}{l^2}, \quad \text{d'où} \quad q = l \times f^{\frac{1}{2}}.$$

Si l'on remplace par L et $[f]$ les quantités l et f, on trouve

$$[q] = \left[L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}\right].$$

POTENTIEL OU FORCE ÉLECTROMOTRICE $[e]$. — D'après la définition du potentiel, on exprimera son unité de mesure en divisant l'unité de masse électrique par l'unité de distance, c'est-à-dire $[q]$ par $[L]$, ce qui donne

$$[e] = \left[L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}\right].$$

Cette formule exprime aussi l'unité de force électromotrice; car la force électromotrice, n'étant pas autre chose qu'une différence de deux potentiels, se mesure au moyen de l'unité de potentiel.

CAPACITÉ $[c]$. — La charge q est égale au produit de la capacité par le potentiel ou par une différence de potentiels,

comme on peut le vérifier à l'aide d'une bouteille de Leyde; nous trouverons les dimensions de l'unité de capacité en divisant $[q]$ par $[e]$; d'où la formule

$$[c] = [\mathrm{L}],$$

qui montre que la capacité électrostatique est une quantité linéaire : la sphère, par exemple, a pour mesure de sa capacité la longueur de son rayon.

INTENSITÉ DE COURANT $[i]$. — L'intensité d'un courant est définie par le quotient $\frac{q}{t}$, c'est-à-dire par le rapport de la quantité d'électricité qui traverse la section d'un fil au temps qu'elle emploie pour y passer : c'est donc la quantité d'électricité qui passe par la section d'un fil en une seconde. Pour avoir l'expression de l'unité d'intensité, il suffit de diviser $[q]$ par $[\mathrm{T}]$; d'où

$$[i] = \left[\mathrm{L}^{\frac{3}{2}}\mathrm{M}^{\frac{1}{2}}\mathrm{T}^{-2}\right].$$

RÉSISTANCE $[r]$. — En vertu de la formule de Ohm $\mathrm{I} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{R}}$, qui est applicable à un flux quelconque d'électricité, on a

$$\mathrm{R} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{I}};$$

on divisera donc $[e]$ par $[i]$ pour avoir les dimensions de $[r]$; d'où

$$[r] = [\mathrm{L}^{-1}\mathrm{T}].$$

On voit que, en mesure électrostatique, une résistance est l'inverse d'une vitesse, puisqu'on a

$$[v] = [\mathrm{LT}^{-1}].$$

XV. — RAPPORTS ENTRE LES UNITÉS ÉLECTROSTATIQUES DE MÊME NOM DANS LES TROIS SYSTÈMES C.G.S., MILLIM.-MILLIGR.-S., MÈTRE.-G.-S.

On appliquera la méthode indiquée au § XII pour déterminer le rapport qui existe entre les valeurs des unités électro-

statiques de même nom dans les systèmes obtenus en attribuant des valeurs différentes aux unités fondamentales. Voici les résultats que l'on trouve pour les systèmes les plus répandus, en désignant par 1 l'unité du système C.G.S. et en rapportant à cette dernière les valeurs des unités de même nom dans les autres systèmes.

	Systèmes		
	C. G. S.	millim.-millig.-S.	M. G. S.
$(q) = (L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1})$	1	$\frac{1}{1000}$	1000
$(e) = (L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1})$	1	$\frac{1}{100}$	10
$(c) = (L)$	1	$\frac{1}{10}$	100
$(i) = (L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2})$	1	$\frac{1}{1000}$	1000
$(r) = (L^{-1} T)$	1	10	$\frac{1}{100}$

Ces rapports expliquent la diversité des valeurs qu'on assigne habituellement au potentiel maximum des machines électriques, c'est-à-dire à celui qui fournit des étincelles de 30^c environ. Certains auteurs attribuent, en effet, à ce potentiel la valeur 30; d'autres la valeur 300, et d'autres enfin la valeur 80 000. Les valeurs 30 et 300 se rapportent, la première au système M.G.S; la seconde au système C.G.S; elles sont identiques, puisque les unités du premier système sont dix fois plus fortes que les unités du deuxième. L'unité à laquelle se rapporte la valeur 80000 est le potentiel d'un élément Daniell qui vaut 0,00374 en unité du système C.G.S.; en effet ce nombre, multiplié par 80 000, donne à très peu près 300.

Si l'on veut calculer avec des unités différentes le travail accompli par la décharge d'un condensateur ou par un courant voltaïque, on appliquera les formules

$$W = i^2 rt = eit,$$

en se rappelant (§ XIII) que les valeurs numériques d'une même grandeur sont en raison inverse des valeurs des unités auxquelles elle est rapportée.

En faisant $t = 1$, nous aurons

	Systèmes	
C. G. S.	millim.-millig.-S	M. G. S.
$W = i^2 r = 1 \ldots\ldots\ldots$	$(1000)^2 \frac{1}{10} = 10^5$	$\left(\frac{1}{1000}\right)^2 100 = \frac{1}{10^4}$
$W = ei = 1 \ldots\ldots\ldots$	$100 \times 1000 = 10^5$	$\frac{1}{10} \times \frac{1}{1000} = \frac{1}{10^4}$

Ces résultats concordent parfaitement; car, dans les deuxième et troisième systèmes les unités de travail ont respectivement les valeurs (§ XII) $\frac{1}{10^5}$ et 10^4 par rapport au travail 1 du système C.G.S.; en ramenant au système C.G.S. les travaux exprimés suivant les autres systèmes, on a toujours $W = 1$.

XVI. — UNITÉS ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

Nous désignerons ces unités par des lettres majuscules pour les distinguer des unités électrostatiques.

QUANTITÉ MAGNÉTIQUE [Q']. — Dans le système électrostatique, le point de départ est la quantité d'électricité qui, concentrée en un point ou dans une petite sphère, repousse avec une force 1 une quantité égale d'électricité située à la distance 1; on a pris pour point de départ, dans le système d'unités électromagnétiques, la quantité de magnétisme ou pôle magnétique qui repousse avec la force 1 un pôle égal situé à la distance 1 [1]. L'unité de quantité magnétique a par suite les mêmes dimensions que l'unité de quantité électrostatique (§ XIV), c'est-à-dire que

$$[Q'] = \left[L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}\right].$$

---

[1] *L'unité de magnétisme* concentrée aux pôles d'une aiguille perpendiculaire au plan du méridien magnétique est celle qui produit la force dite *composante horizontale du magnétisme terrestre*. C'est la force avec laquelle chaque pôle d'intensité *un* tend à tourner vers ce méridien. Elle était à Rome, en 1883, de 0,2292 dynes.

INTENSITÉ [I]. — L'unité d'intensité correspond à la quantité d'électricité qui passe par chaque section d'un circuit dans l'unité de temps, c'est-à-dire en une seconde.

Un élément ds de courant exerce sur un pôle magnétique P une action qui tend à le déplacer normalement au plan déterminé par cet élément ds et par ce même point P. Si ce pôle contient la quantité de magnétisme q et se trouve placé sur la normale à l'élément ds, la force qui tend à le déplacer (i représentant l'intensité du courant, l la distance de ds à P) est proportionnelle à

$$\frac{q \times i}{l^2} \times ds.$$

En admettant que le courant décrive un arc de cercle ayant pour centre le pôle P, la force totale avec laquelle P est poussé normalement au plan du cercle sera proportionnelle à

$$\frac{q \times i}{l^2}(ds + ds' + ds'' + \ldots)$$

et, si l'on pose

$$ds + ds' + ds'' + \ldots = l,$$

c'est-à-dire si l'on considère une longueur de courant circulaire égale à la longueur du rayon du cercle, la force f sera simplement proportionnelle à

$$\frac{q \times i}{l};$$

$\frac{1}{k}$ étant une constante, on aura

$$f = \frac{1}{k}\frac{q \times i}{l}, \quad \text{d'où} \quad i = k\frac{\times l}{q}.$$

Conformément aux principes énoncés au § II, les dimensions de l'unité d'intensité [I] du courant seront données par

$$[\mathrm{I}] = \frac{[f]\,\mathrm{L}}{\mathrm{Q}'},$$

ou, si nous substituons les valeurs de $[f]$ et de $[\mathrm{Q}']$,

$$[\mathrm{I}] = \left[\mathrm{L}^{\frac{1}{2}}\mathrm{M}^{\frac{1}{2}}\mathrm{T}^{-1}\right].$$

De ces développements il résulte que :

L'unité de courant est celle qui, parcourant un arc de longueur et de rayon 1, *exerce la force* 1 *sur la quantité de magnétisme* 1 *placée au centre de l'arc.*

Or la circonférence entière contient 3,14 diamètres, ou 6,28 rayons; donc un courant qui parcourt toute la circonférence exerce une action 6,28 fois plus forte que le courant-unité dont nous venons de parler. Par suite, on peut encore dire que :

L'unité de courant est le courant qui, dans un circuit plié en un cercle de rayon 1, *exerce sur la quantité de magnétisme* 1 *placée au centre, la force de* 6,28 *unités absolues, ou plus exactement* 2π *unités absolues* (c'est-à-dire, dans le système C.G.S.) 2π dynes, qui valent

$$6,28 \times 0^{gr},00102 = 0^{gr},00641.$$

Il convient de rappeler ici que l'intensité de courant se mesure avec le galvanomètre; on la détermine d'une façon exacte avec la boussole des sinus et des tangentes.

L'équivalence entre l'intensité de courant et la quantité d'électricité qui passe en une seconde est une des notions fondamentales de la théorie des mesures électriques, mais il est bien entendu que ces deux quantités ne sont pas identiques; on veut simplement exprimer qu'il y a une proportionnalité constante entre l'intensité mesurée au galvanomètre et le débit du courant, ou la quantité qui dans une expérience traverse chaque section du conducteur en une seconde. On trouve une preuve évidente de cette proportionnalité dans une expérience de Pouillet. On fait tourner une roue sur le pourtour de laquelle sont incrustées des lames alternées de métal et de substance isolante. Un ressort qui s'appuie sur la périphérie de la roue sert à amener le courant que l'on peut ainsi interrompre à volonté. Dans une de ses expériences, Pouillet observa que, sous un courant continu, la boussole des sinus accusait une déviation de 60°, et qu'avec un interrupteur ayant des intervalles de bois et de métal de même largeur et faisant

(1) Pouillet, *Éléments de Physique*, 7e édition, p. 645.

vingt tours par seconde, l'aiguille restait immobile à 25°45'. Or

$$\sin 60^\circ = 2 \sin 25^\circ 45',$$

c'est-à-dire que l'intensité était réduite de moitié.

D'autre part, la quantité d'électricité qui passe avec l'interrupteur dans le même temps est évidemment la moitié de la première quantité, puisque, pendant la moitié du temps, le ressort appuie sur les dents isolantes.

RÉSISTANCE [R]. — On sait que l'expression du travail accompli par le courant passant par un conducteur de résistance r dans un temps t est

$$W = i^2 rt,$$

d'où

$$r = \frac{W}{i^2 t}.$$

Pour former l'équation de dimension de l'unité de résistance en mesure électromagnétique, nous substituerons dans cette formule à W l'expression de l'unité de travail, à i l'expression de l'unité d'intensité électromagnétique, ce qui donne

$$[R] = [LT^{-1}].$$

Cette expression remarquable représente une vitesse, tandis que l'unité de résistance $[r]$ électrostatique était l'inverse d'une vitesse.

FORCE ÉLECTROMOTRICE OU POTENTIEL [E]. — De la formule de Ohm, on tire

$$e = ir,$$

d'où

$$[E] = [I][R],$$

$$[E] = \left[L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}\right].$$

QUANTITÉ ÉLECTRIQUE [Q]. — Soient i la quantité d'électricité qui passe par chaque section du circuit dans l'unité de temps, et q la quantité qui passe dans le temps t; on a

$$q = it,$$

et, par conséquent, l'équation de dimensions

$$[Q] = \left[L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}\right].$$

CAPACITÉ [C]. — De la relation générale

$$M = CV,$$

on tire

$$[C] = \frac{[Q]}{[E]},$$

$$[C] = [L^{-1} T^2].$$

XVII. — RAPPORT ENTRE LES UNITÉS ÉLECTROMAGNÉTIQUES DE MÊME NOM DANS LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES.

En opérant comme au § XV et désignant par 1 les unités électromagnétiques du système C. G. S., on trouve aisément les valeurs que possèdent ces unités dans les différents systèmes.

	Systèmes.		
	C. G. S.	millim.-millig. S.	M. G. S.
$[Q'] = \left[L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}\right]$	1	$\frac{1}{1000}$	1000
$[I] = \left[L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}\right]$	1	$\frac{1}{100}$	10
$[R] = [LT^{-1}]$	1	$\frac{1}{10}$	100
$[E] = \left[L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}\right]$	1	$\frac{1}{1000}$	1000
$[Q] = \left[L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}\right]$	1	$\frac{1}{100}$	10
$[C] = [L^{-1} T^2]$	1	10	$\frac{1}{100}$

Appliquons, comme au § XV, ces diverses mesures au travail accompli par un courant pour lequel I, R, E ont des valeurs données; nous nous servirons des formules

$$W = I^2 R t = EIT,$$

en tenant compte de la règle du § XIII. Pour $t = 1$, nous aurons

	Systèmes		
	C. G. S.	millim.-millig.-S.	M. G. S.
$W = I^2 R = 1$	$100^2 \times 10 = 10^5$	$\left(\frac{1}{10}\right)^2 \times \frac{1}{100} = \frac{1}{10^4}$	
$W = EI = 1$	$1000 \times 100 = 10^5$	$\frac{1}{1000} \times \frac{1}{10} = \frac{1}{10^4}$	

Ces résultats sont en concordance parfaite, eu égard aux diverses valeurs que les unités possèdent dans les différents systèmes.

XVIII. — TABLEAU DES DIMENSIONS DES UNITÉS ÉLECTROSTATIQUES U.E.S. ET DES UNITÉS ÉLECTROMAGNÉTIQUES U.E.M. ET DE LEURS RAPPORTS.

Nous avons réuni dans le Tableau suivant toutes les équations de dimensions déterminées jusqu'à présent. De ces équations on déduit immédiatement les rapports qui existent entre les unités de même nom; ces rapports sont inscrits dans la dernière colonne.

	Dimensions des unités de mesure		
	électrostatiques. U. E. S	électromagnétiques. U. E. M.	Rapport $\frac{\text{U. E. S}}{\text{U. E. M.}}$.
Quantités...	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	$L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}$	$LT^{-1} = (LT^{-1})^{+1}$
Potentiel....	$L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-2}$	$L^{-1}T = (LT^{-1})^{-1}$
Capacité....	L	$L^{-1}T^{2}$	$L^{2}T^{-2} = (LT^{-1})^{+2}$
Courant.....	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-2}$	$L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	$LT^{-1} = (LT^{-1})^{+1}$
Résistance...	$L^{-1}T$	LT^{-1}	$L^{-2}T^{2} = (LT^{-1})^{-2}$

Il y a lieu d'observer :

1° Que les rapports de deux unités homologues quelconques sont indépendantes de l'unité de masse;

2° Que tous ces rapports dépendent du seul rapport $\frac{L}{T}$ (qui est une vitesse) élevé à la puissance ± 1, ± 2.

Si l'on pose

$$L = L_1 \text{ centimètres,}$$
$$M = M_1 \text{ grammes,}$$
$$T = T_1 \text{ secondes,}$$

les expressions obtenues représentent des nombres d'unités électrostatiques et électromagnétiques du système C. G. S. (§ II), et les rapports entre ces nombres d'unités sont fournis

par la Table où il suffit de changer, dans la dernière colonne, L et T en L_1 et T_1.

Si, de plus, L_1, M_1, T_1 sont choisis de telle manière que les deux mesures d'un même élément électrique, c'est-à-dire la mesure E. S. et la mesure E. M., représentent des grandeurs *absolues* égales, potentiel, quantité, etc., les unités correspondant à ces mesures, c'est-à-dire l'unité E. S. (C. G. S). et l'unité E. M. (C. G. S.), auront entre elles un rapport inverse du précédent. Pour le montrer sur un exemple, supposons que L_1, M_1, T_1 soient choisis de façon que les quantités électriques *absolues*, mesurées en unités E. S. et E. M., soient égales; c'est-à-dire qu'il y ait égalité par rapport à la grandeur absolue déterminée par elles, entre les expressions

$$L_1^{\frac{3}{2}} M_1^{\frac{1}{2}} T_1^{-1} \text{ unités électrostatiques de quantité C. G. S.}$$
$$= L_1^{\frac{1}{2}} M_1^{\frac{1}{2}} \text{ unités électromagnétiques de quantité C. G. S.}$$

On voit que cette équation donne $L_1^{-1} T_1$ pour le rapport des unités E. S. et E. M.

En divisant par $L_1^{\frac{1}{2}} M_1^{\frac{1}{2}}$, et désignant $\frac{L_1}{T_1}$ par la vitesse définie et concrète v, on a

$$v \text{ unités électrostatiques de quantité C. G. S.}$$
$$= 1 \text{ unité électromagnétique de quantité C. G. S.}$$

ou, si l'on emploie les symboles habituels,

$$v[q] = [Q], \quad \frac{[Q]}{[q]} = v.$$

XIX. — VITESSE CRITIQUE DE WEBER.

Supposons qu'on calcule, avec les deux espèces de mesures E. S. et E. M. (système C. G. S.), le travail fait par un courant donné dans un temps donné. Les deux méthodes doivent fournir le même nombre d'ergs : si donc on représente, comme d'habitude, par de petites lettres les mesures E. S.

et par des majuscules les mesures E. M., on aura les identités suivantes :

$$i^2 rt = \mathrm{I}^2 \mathrm{R}\, t,$$
$$eit = \mathrm{EI}\, t,$$
$$eq = \mathrm{EQ},$$
$$e^2 c = \mathrm{E}^2 \mathrm{C}.$$

Considérons la plus simple de ces formules, c'est-à-dire la troisième

$$eq = \mathrm{EQ};$$

et rappelons que, suivant la conclusion du paragraphe précédent, on a

$$q = v\mathrm{Q}.$$

De ce rapport découlent ceux qui se rapportent aux mesures des autres éléments électriques. On aura, en effet,

$$e \times v\mathrm{Q} = \mathrm{EQ},$$

d'où

$$e = \frac{\mathrm{E}}{v}.$$

A l'aide des autres équations et de substitutions très simples, on trouve pareillement

$$i = v\mathrm{I},$$
$$r = \frac{\mathrm{R}}{v^2},$$
$$c = v^2\mathrm{C};$$

d'où l'on voit que, si un élément électrique quelconque est exprimé par deux nombres se rapportant aux deux espèces d'unités E. S. et E. M., il existe toujours entre ces deux nombres un rapport donné par les puissances du même nombre v (1); c'est ce qu'exprime d'une façon très simple le Tableau suivant :

(1) Ce mode de déduction est tiré des *Leçons de MM. Mascart et Joubert*, t. I, p. 671.

1	unité E.M. de	quantité	$= v$	unités E.S. de	quantité,
1	»	courant	$= v$	»	courant,
1	»	capacité	$= v^2$	»	capacité,
v	»	potentiel	$= 1$	»	potentiel,
v^2	»	résistance	$= 1$	»	résistance;

d'où enfin

$$\frac{[Q]}{q} = \frac{[I]}{i} = \frac{[e]}{E} = v,$$

$$\frac{[C]}{[c]} = \frac{[r]}{[R]} = v^2.$$

Le nombre v, qui désigne une vitesse concrète, a reçu de Weber le nom de *vitesse critique*.

XX. — VALEUR NUMÉRIQUE DE V.

On détermine, à l'aide de diverses méthodes, la valeur numérique de la vitesse v dont nous venons de parler. Ces méthodes sont toutes fondées sur le même principe ; on a considéré tantôt l'une, tantôt l'autre des grandeurs indiquées plus haut, par exemple la quantité, le potentiel, etc., et l'on a cherché, par des expériences ingénieuses et précises, à en exprimer la valeur par des nombres se rapportant aux deux espèces d'unités. Le rapport inverse de ces nombres est le rapport des unités correspondantes. C'est aux physiciens Weber et Kohlrausch qu'on doit les premières déterminations de v; ils ont essayé de calculer la quantité électrique concentrée dans un condensateur : 1° en unités E. S. au moyen du potentiel et de la capacité; 2° en unités E.M. au moyen de la déviation d'un galvanomètre dont la bobine était traversée par la décharge du condensateur.

Voici une Table des résultats obtenus par eux et de quelques autres résultats peu différents, qui inspirent une égale confiance : cette Table a été dressée par M. Gordon [1].

---

[1] J.-E.-H. Gordon, *OEuvr. cit.*, t. II, 2e Partie, Chap. XLV.

Expérimentateurs.	Valeurs de v.	
Weber et Kohlrausch	3,1074	$\times 10^{10}$.
Thomson	2,825	
Maxwell	2,8798	
M. Kichan	2,93	
Ayrton et Perry	2,980	
Hockin	2,988	
Rowland	3,0448	

M. Gordon accorde plus de confiance aux quatre derniers résultats dont la moyenne est

$$v = 2,9857 \times 10^{10}.$$

Si l'on se rappelle que ce rapport indique en réalité une vitesse exprimée en centimètres, on voit qu'il correspond à peu près à la vitesse de la lumière ($3,004 \times 10^{10}$ centimètres, d'après Cornu) et à la vitesse de l'électricité.

On adopte généralement pour v

$$3 \times 10^{10} \text{ centimètres} = 300\,000 \text{ kilomètres}.$$

Entre la lumière et l'électricité il existe des relations intimes que fait ressortir un rapport curieux découvert dans plusieurs corps entre l'indice de réfraction des rayons les moins réfrangibles et la *capacité inductive spécifique* de ces mêmes corps. Cette question sera l'objet du paragraphe suivant.

XXI. — INDICE DE RÉFRACTION ET CAPACITÉ INDUCTIVE.

Maxwell a montré par l'analyse mathématique que, quel que soit le milieu qui sert à transmettre à distance à travers l'espace les actions magnétiques et électriques, ce milieu est soumis à des vibrations transversales perpendiculaires aux lignes de force, et que la vitesse avec laquelle ces actions se propagent à travers l'espace doit correspondre au rapport v qui lie les unités E. S. et les unités E. M. Ces conditions se réalisant pour la lumière, il en faut conclure que le milieu électromagnétique est identique au milieu optique, c'est-à-dire que le milieu (éther) qui sert à propager la lumière forme aussi les radiations électriques et magnétiques, ou que la ra-

diation lumineuse est une sorte de radiation électromagnétique.

Cette hypothèse se trouve confirmée par une autre déduction mathématique; en effet, Maxwell démontre que, si le milieu pondérable change, la vitesse de la propagation électrique doit changer; elle diminue dans les diélectriques qui ont une capacité inductive plus grande et varie en raison inverse de la racine carrée de la capacité. Ainsi, en représentant par 1 la capacité de l'air, on aurait entre la vitesse v dans l'air, qui est à peu près égale à 3×10^{10} centimètres, et la vitesse v' dans un autre milieu diélectrique de capacité inductive spécifique K, la proportion

$$\frac{v}{v'} = \frac{\sqrt{K}}{1},$$

d'où

$$v' = \frac{v}{\sqrt{K}}.$$

Or on sait que la lumière se propage avec des vitesses différentes dans les divers milieux, et que le rapport des sinus d'incidence et de réfraction est égal au rapport direct des vitesses dans les deux milieux. Par suite, si l'on appelle n l'indice de réfraction d'un corps par rapport à l'air, on a, pour la vitesse v'' de la lumière à l'intérieur de ce corps,

$$\frac{v}{v''} = \frac{\sin i}{\sin r} = n,$$

d'où

$$v'' = \frac{v}{n}.$$

Donc, s'il y a identité de nature entre les deux espèces de radiations, on aura $v' = v''$, et, par suite, pour un même milieu l'indice de réfraction n devra être égal à la racine carrée de sa capacité diélectrique; on devra donc avoir

$$K = n^2.$$

Ce résultat remarquable, qui se vérifie expérimentalement pour un grand nombre de substances, a été annoncé pour la

première fois par le professeur Boltzmann. Voici quelques-uns des nombres qu'il a obtenus :

Diélectrique.	K.	n^2.
Soufre	3,84	4,06
Soufre cristallisé suivant ses différents axes	4,773	4,596
	3,970	3,886
	3,811	3,591
Paraffine	2,32	2,33
Colophane	2,55	2,38

Pour les gaz ci-après, supposés à 0°C. et à la pression de 760^{mm}, on a pris les indices de réfraction par rapport au vide et la capacité du vide pour unité :

	$\sqrt{K}$.	n.
Air	1,000295	1,000294
Acide carbonique	1,000473	1,000449
Hydrogène	1,000132	1,000138
Oxyde de carbone	1,000345	1,000340
Protoxyde d'azote	1,000497	1,000503
Gaz oléfiant	1,000656	1,000678
Gaz des marais	1,000472	1,000443

La concordance presque complète des vitesses des deux genres de radiations, particulièrement dans l'air et dans les gaz, montre bien qu'il doit exister entre ces radiations un lien étroit et peut-être une identité parfaite de nature, qu'altèrent de simples différences de forme. Faraday semble l'avoir pressenti : « Il est permis, dit-il, d'admettre que la transmission de la force magnétique peut s'effectuer par l'intermédiaire de l'éther, car il est vraisemblable que, si cet éther existe, il peut remplir un autre rôle que celui de servir exclusivement à la propagation de la lumière. » (*Experim. Researches*, 3075.)

XXII. — UNITÉS ÉLECTROMAGNÉTIQUES PRATIQUES DITES AUSSI UNITÉS TECHNIQUES (1).

On trouve aisément (§ XLVIII) que la résistance [R] est à peu de chose près la résistance de $\frac{1}{20000}$ de millimètre d'un fil de cuivre ayant 1^{mm} de diamètre; c'est donc une unité excessivement petite au point de vue pratique. D'autre part, la force [E] a pour valeur

$$\frac{1}{3 \times 10^{10}}[e] = 0,000\,000\,000\,033[e],$$

et le potentiel d'une pile Daniell, qui vaut (§ XV) 0,00374 en mesure électrostatique, devrait être exprimé par

$$113\,333\,333\,[E].$$

L'unité [E] est donc fort incommode encore à cause de sa petitesse.

Le plus souvent ces deux unités conduiraient à des nombres formés d'une série démesurée de chiffres, très incommodes dans les calculs et qu'il serait impossible de retenir ou même de concevoir. C'est pour cette raison que le Comité de l'Association britannique, institué en 1861 dans le but d'établir un système pratique et rationnel de mesures électriques, créa des unités techniques (pratiques) de résistance et de force électromotrice, qui ont pour valeurs les unités simples multipliées par une haute puissance de 10. De ces unités pratiques de résistance et de force électromotrice, le Comité tira ensuite les unités pratiques de courant, de quantité, de capacité. Ainsi fut fondé un système complet de mesures beaucoup plus appropriées aux besoins de la pratique, parce qu'elles facilitent et simplifient les calculs des diverses industries modernes qui se servent de l'électricité. Consacré, après quelques modifications, par le Congrès international des Électriciens, tenu à

(1) Cette dénomination d'*unités techniques* est employée par le Dr Schellen dans son ouvrage *Die magnet- und dynamo-elektrischen Maschinen*, 3e édit.; 1884.

Paris en septembre 1881, le système de l'Association britannique, qu'on désignait primitivement par les initiales B.A. (*British Association*), est devenu aujourd'hui universel. Les trois unités fondamentales C.G.S., adoptées par les Anglais en 1875, sont encore les bases du système des unités simples, et par conséquent de toutes les unités techniques qui en sont des multiples.

Nous passerons maintenant en revue les nouvelles mesures techniques (pratiques) pour en faire ensuite l'application à divers exemples et problèmes.

XXIII. — OHM, UNITÉ TECHNIQUE DE RÉSISTANCE.

Sa valeur fut fixée comme il suit

$$1 \text{ ohm} = 10^9 \text{U.E.M.}[\text{R}]\text{C.G.S.}$$

ou bien encore

$$1 \text{ ohm} = \frac{1}{9 \times 10^{11}} \text{U.E.S.}[r]\text{C.G.S.}$$

La résistance ainsi définie s'appelle l'*ohm théorique,* parce qu'elle diffère légèrement de l'étalon construit par le Comité de l'Association britannique qu'on désigne par le symbole B.A. ohm, les Tables de résistance qui nous fourniront les données nécessaires pour les exercices numériques se rapportant généralement à ce dernier.

Une autre unité pratique, peu différente de l'ohm, est l'unité *Siemens,* qui a été construite et employée d'abord par le célèbre électricien de ce nom [1]. C'est la résistance d'une colonne de mercure à 0° C., de 1^m de longueur et de 1^{mmq} de section.

Nous indiquerons, au paragraphe suivant, la valeur de l'ohm B. A. et celle du siemens.

En attendant, et pour donner une idée de la grandeur de l'ohm, nous dirons qu'un fil de cuivre pur recuit, de 1^{mm} de dia-

---

[1] C'est en réalité à Pouillet qu'il convient d'attribuer la création de l'unité mercurielle. P. M.

mètre et de 50^m de longueur environ, offre à 0°C. une résistance de 1 ohm. La résistance du fil de cuivre du commerce est plus grande; il suffit d'une longueur de 30^m à 40^m de ce fil, le diamètre étant encore 1^{mm}, pour former une résistance de 1 ohm.

Le charbon d'une lampe Swan (dernier modèle anglais) (1), qui consiste en un filament d'environ $12^c,7$ de longueur et $0^c,013$ de diamètre, a, pendant son incandescence normale de la force de 20 bougies (2), une résistance d'environ 143 ohms. Dans les lampes moins perfectionnées, cette résistance est beaucoup plus faible (§ XXVI). La résistance du corps humain d'une main à l'autre a varié, pour quatre personnes, de 1500 ohms à 3400 ohms.

XXIV. — OHM LÉGAL ET AUTRES DÉCISIONS DU CONGRÈS DES ÉLECTRICIENS DE 1884.

On comprend aisément qu'un ohm théorique ne présente aucun intérêt dans la pratique : aux industries fondées sur les applications de l'électricité il faut un étalon pratique de l'ohm, et elles n'ont besoin que de cet étalon. C'est pourquoi le

---

(1) Gordon, *A pract. Treat. on elect. Lighting*, p. 12; 1884.

(2) Pour apprécier exactement les indications des auteurs sur le pouvoir éclairant des lampes électriques, il suffit de connaître les valeurs des mesures suivantes, qui sont généralement employées :

Lampe Carcel (unité française) : elle consomme par heure 42^{gr} d'huile de colza raffinée.

Bougie anglaise de spermaceti, étalon dit *Parlamentary standard* : 1 carcel vaut 7,435 boug. angl., et, suivant d'autres, 8 et même 9 boug. angl.

Bougie de paraffine, étalon usité en Allemagne : 7,607 valent 1 carcel.

Bougie stéarique de Munich : 6,743 valent 1 carcel.

Cette dernière bougie dépense en moyenne $10^{gr},4$ de stéarine par heure et donne une flamme de 52^{mm} de haut.

Dans le Congrès des Électriciens de 1884, on décida à l'unanimité d'adopter l'unité nouvelle de lumière proposée par M. Violle et ainsi définie :

L'unité de chaque lumière simple est la quantité de lumière de même espèce émise en direction normale par un centimètre carré de platine fondu et à la température de solidification.

L'unité pratique de lumière blanche est la quantité de lumière émise normalement par la même source.

(Voir *Lumière électrique*, décembre 1884 : *Note sur la détermination de l'étalon absolu de lumière*, par M. J. Violle.)

Congrès des Électriciens, tenu en 1881 à Paris, à l'occasion de l'Exposition d'Électricité, décida qu'il y avait lieu de déterminer par de nouvelles expériences la longueur exacte que doit avoir une colonne de mercure de 1^{mmq} de section pour représenter, aussi rigoureusement que possible, l'ohm théorique de 10^9 U. E. M. Cette valeur fut fixée, dans un nouveau Congrès international tenu également à Paris, en 1884. Dans cette dernière réunion on examina les diverses valeurs de l'ohm qui inspiraient le plus de confiance et qu'on avait obtenues à l'aide de six méthodes différentes.

Le 28 avril 1884, sur la proposition du professeur Roiti, qui, avec le professeur Tacchini, représentait l'Italie, on adopta le nombre rond 106^c, c'est-à-dire celui qui se rapprochait le plus des valeurs réputées les plus exactes, et, d'ailleurs, il est permis de négliger dans la pratique une différence de 2^{mm} à 3^{mm} (1). Cette décision fut libellée dans les termes suivants :

L'ohm légal est la résistance d'une colonne de mercure de 1^{mmq} *de section et de* 106^c *de longueur à la température de la glace fondante.*

A cette résolution furent joints les vœux suivants :

La Conférence émet le vœu que le Gouvernement français veuille bien transmettre sa résolution aux divers États, et en recommande l'adoption internationale.

La Conférence recommande la construction d'étalons primaires en mercure, conformes à la résolution précédemment adoptée, et concurremment, l'emploi d'échelles de résistances secondaires en alliages solides, qui seront fréquemment comparées entre elles et avec l'étalon primaire.

Parmi les alliages, le Congrès recommanda l'argentan, l'alliage platine-argent et platine-iridium ; ce dernier (10 pour 100) sert aussi à construire les mètres étalons, parce qu'il est peu dilatable et chimiquement inaltérable (2).

---

(1) Le professeur Roiti avait trouvé, à la suite de longues et minutieuses expériences, le nombre $105^c,896$ (Journal *Nuovo Cimento*, vol. XV, p. 97; mars-avril 1884).

(2) Voir *Lumière électrique*, 1884, et la Notice du professeur Roiti, *Sur la Conférence internationale pour les unités électriques ;* Rome, 1884.

Ces explications nous permettent maintenant d'indiquer le rapport de l'ohm légal avec le siemens et avec l'ohm B.A.

L'ohm légal et le siemens étant les résistances de deux colonnes de mercure de 106^c et 100^c de longueur, nous aurons

$$\frac{106}{1 \text{ ohm légal}} = \frac{100}{1 \text{ siemens}};$$

d'où

$$1 \text{ siemens} = 0,94339 \text{ ohm légal},$$
$$1 \text{ ohm légal} = 1,06 \text{ siemens};$$

et, puisque (*voir* Ouvrage cité de Everett, n° 173)

$$1 \text{ ohm B.A.} = 1,0493 \text{ siemens},$$
$$1 \text{ siemens} = 0,953 \text{ ohm B.A.};$$

on aura aussi

$$1 \text{ ohm B.A.} = 1,0493 \times 0,94339 \text{ ohm légal},$$

c'est-à-dire

$$1 \text{ ohm B.A.} = 1,9899 \text{ ohm légal},$$
$$1 \text{ ohm légal} = 1,0102 \text{ ohm B.A.}\ (^1).$$

On voit qu'il suffira habituellement, pour réduire les ohms B.A. en siemens, et réciproquement, d'ajouter ou de retrancher le 5 pour 100, puisque

$$100 \text{ siemens} = 95 \text{ ohms B.A.},$$
$$100 \text{ ohms B.A.} = 105 \text{ siemens}.$$

XXV. — VOLT, UNITÉ TECHNIQUE DE FORCE ÉLECTROMOTRICE.

Sa valeur est

$$1 \text{ volt} = 10^8 \text{ U.E.M. [E] C.G.S.}$$

---

(1) Le professeur Roiti, qui a trouvé pour l'ohm la longueur de la colonne de mercure 105,896, concluait ainsi (*voir* Recueil déjà cité) :

$$1 \text{ ohm B.A.} = 0,99024 \text{ ohm}.$$
$$1 \text{ siemens} = 0,94432 \text{ »}$$

et, par suite (§ XIX)

$$1 \text{ volt} = \frac{1}{3 \times 10^2} \text{ U.E.S. } [e] \text{ C.G.S.}$$

En Italie on écrit *volta* au lieu de *volt;* partout ailleurs on emploie le mot *volt,* au pluriel *volts.*

Les Anglais ont adopté comme étalon pratique de force électromotrice une pile particulière dite *pile de Latimer-Clark,* qui, à circuit ouvert, demeure très constante et qui vaut $1^{\text{volt}},457$.

On a adopté ailleurs d'autres étalons (¹).

On peut admettre, en général, qu'*un volt* correspond à peu près à la force électromotrice d'un élément Daniell. En effet, sa mesure E. S. 0,00374, multipliée par 3×10^{10}, donne

$$\frac{0{,}00374 \times 3 \times 10^{10}}{10^8} \text{ volt} = 1^{\text{volt}},122.$$

En formant la pile Daniell de différentes façons, M. Latimer-Clark a trouvé les forces électromotrices suivantes :

Daniell n° I, zinc amalgamé.	1ᵖ ac. sulf. 4ᵖ eau.	Sulfate de cuivre saturé.	Cuivre.	volt 1,079.
Daniell n° II, zinc amalgamé.	1ᵖ ac. sulf. 12ᵖ eau.	Sulfate de cuivre saturé.	Cuivre.	0,978.
Daniell n° III, zinc amalgamé.	1ᵖ ac. sulf. 12ᵖ eau.	Azotate de cuivre saturé.	Cuivre.	1,000.

La lampe Swan, dont on a parlé au paragraphe précédent, exige une force électromotrice de 100 volts pour fournir son éclairement normal de 20 bougies. D'autres lampes, dont le filament est de matière différente, n'exigent que de 40 volts à 45 volts.

Le potentiel qui donne une étincelle entre deux plaques distantes de 1^{mm} est d'environ 14,7 unités E.S. Il est, par conséquent, équivalent à

$$14^{\text{volts}},7 \times 3 \times 10^2 \text{ volts} = 4410 \text{ volts}.$$

(¹) *Voir* le *Formulaire de l'Électricien* de M. Hospitalier, 2ᵉ année, p. 59; 1884.

Le potentiel 300, qui donne des étincelles de 30^c environ, équivaut à

$$300 \times 3 \times 10^2 \text{ volts} = \text{environ } 9000 \text{ volts.}$$

XXVI. — AMPÈRE, UNITÉ TECHNIQUE D'INTENSITÉ DE COURANT, OU SIMPLEMENT UNITÉ DE COURANT.

L'ampère est défini par la formule

$$1 \text{ ampère} = \frac{1^{\text{volt}}}{1^{\text{ohm}}};$$

d'où l'on déduit, pour sa valeur théorique,

$$1 \text{ ampère} = 10^{-1} \text{ U.E.M.} [I] \text{ C.G.S.},$$

ou encore

$$1 \text{ ampère} = 3 \times 10^9 \text{ U.E.S.} [i] \text{ C.G.S.}$$

C'est évidemment une unité très grande comparativement à l'unité correspondante U.E.S.; mais un galvanomètre de sensibilité médiocre peut être gradué en millièmes d'*ampère* ou *milliampères*.

Si l'on se reporte à la définition donnée plus haut, on voit que, pour se procurer un étalon pratique de l'ampère, il faudrait avoir des étalons du volt et de l'ohm. Or l'ohm légal est établi; mais le volt légal ne l'est pas encore. Comment pourra-t-on fixer l'étalon de l'unité de courant qui est, pour les diverses industries électriques, une mesure de première utilité? Cette question a été agitée dans le dernier Congrès de Paris (1884); il est très probable que, par la suite, on adoptera une définition de l'ampère légal fondée sur les effets électrolytiques du courant et, particulièrement, sur la précipitation de l'argent (§ XXXV). L'ampère légal étant ainsi défini, on dira que le *volt* est la force électromotrice qui fait passer 1 ampère légal (1 coulomb) à travers un *ohm* légal. En attendant et comme le dit Roiti, il est évident que, à l'égard de l'ampère légal, nous sommes dans des conditions identiques à celles où nous nous trouvions à l'égard de l'ohm, en 1882. Nous en avons une

définition théorique; mais les constructeurs ne savent comment l'utiliser.

Voici quelques exemples de mesures en ampères, obtenues à l'aide des unités pratiques que nous connaissons.

LAMPES SWAN. — Dans le modèle dont nous avons parlé ci-dessus, l'intensité du courant est

$$I = \frac{100^{\text{volts}}}{143^{\text{ohms}}} = 0^{\text{amp}},7.$$

Dans d'autres modèles qui figuraient à l'Exposition de Vienne, de 1883, on a trouvé, en calculant d'après les résistances du charbon à chaud, qui sont à peu près la moitié des résistances du charbon à froid (¹) :

	Pouvoir éclairant.
Lampes Swan.	
$I = \frac{104^{\text{volts}}}{32^{\text{ohms}}} = 3^{\text{amp}},25$	50 bougies
$I = \frac{104^{\text{volts}}}{16^{\text{ohms}}} = 6^{\text{amp}},50$	100
Lampes Maxim.	
$I = \frac{70^{\text{volts}}}{40^{\text{ohms}}} = 1^{\text{amp}},75$	45 à 50
Lampe Cruto.	
$I = \frac{56^{\text{volts}}}{44^{\text{ohms}}} = 1^{\text{amp}},27$	32
$I = \frac{25^{\text{volts}}}{25^{\text{ohms}}} = 1^{\text{amp}},00$	8
Lampes Édison.	
$I = \frac{52^{\text{volts}}}{70^{\text{ohms}}} = 0^{\text{amp}},74$	8
$I = \frac{105^{\text{volts}}}{70^{\text{ohms}}} = 1^{\text{amp}},50$	33

Dans diverses lampes Berstein, qui figuraient à l'Exposition de Turin, le courant est très énergique. On a, par exemple,

I.	E.	Pouvoir éclairant.
5,5	25	55 bougies.
4,0	33,5	55 »
4,0	50	100 »

(¹) *Note sur l'Exposition de Vienne.* S. Fadda, Turin, 1884.

PILE BUNSEN. — Supposons que le zinc amalgamé ait 20^c de hauteur et plonge dans une solution d'acide sulfurique contenant en volume $\frac{1}{20}$ d'acide, l'acide nitrique marquant de 36° à 40° B. La résistance intérieure varie de $0^{ohm},08$ à $0^{ohm},11$, et la force électromotrice est d'environ $1^{volt},8$.

Lorsque le fil extérieur est de résistance négligeable, on a

$$I = \frac{1,8}{0,095} = 19 \text{ ampères environ } (^1).$$

Avec des cylindres de $0^m,19$ de hauteur et de $0^m,09$ de diamètre, on a trouvé 13 ampères.

PILE DANIELL. — Le zinc est extérieur et a $0^m,19$ de hauteur et $0^m,09$ de diamètre; on charge avec dusulfate de zinc et l'on ferme le circuit par un fil de résistance négligeable. Dans ces conditions, le courant est d'environ $1^{amp},3$; par suite,

$$R = \frac{E}{I} = \frac{1}{1,3} = 0^{ohm},8 \text{ environ } (^2).$$

PILE ITALIENNE DES TÉLÉGRAPHES. — Cette pile a une force électromotrice de $0^{volt},95$ et une résistance de $9^{ohms},5$. Par suite,

$$I = \frac{0,95}{9,5} = 0^{amp},1.$$

Avec 4 éléments, l'appareil Morse employé en Italie, dont les bobines ont une résistance de 608 ohms, fonctionne bien en circuit local. Dans ce cas, on aura

$$I = \frac{4 \times 0,95}{608} = 6 \text{ milliampères.}$$

Pour les transmissions télégraphiques on emploie des courants de 13 à 16 milliampères ([3]).

([1]) V. Hospitalier, *Ouvrage cité*, p. 184.

([2]) E. Hospitalier, Ouvrage cité plus haut.

([3]) Cet exemple et les suivants sont tirés d'un bon journal italien, *Le Télégraphiste*, et plus particulièrement des *Lectures populaires* de M. dell' Oro insérées dans ce journal, p. 109, 110; 1883.

MACHINE DYNAMO-ÉLECTRIQUE. — Une machine du type Brush, qui alimentait 16 lampes à la fois, avait une force électromotrice de $839^{\text{volts}},02$, une résistance intérieure de $10^{\text{ohms}},55$ et une résistance extérieure, y compris les lampes, de $73^{\text{ohms}},02$. On a

$$I = \frac{839,02}{10,55 + 73,02} = 10^{\text{ampères}},040.$$

MACHINE DE HOLTZ. — Lorsqu'elle est portée au potentiel 300 (mesure électrostatique), cette machine a, en mesure électromagnétique, une force de 90 000 volts. Or sa résistance intérieure, lorsqu'elle fait deux tours par seconde, a été évaluée à

$$2669 \times 10^6 \text{ ohms environ};$$

par conséquent, le courant auquel elle peut donner naissance a une intensité

$$I = \frac{90000}{2669 \times 10^6} = \frac{3}{100000} \text{ ampères},$$

insuffisante pour la télégraphie.

XXVII. — AMPÈRE ET WEBER.

Rappelons que l'intensité d'un courant est constituée par la quantité d'électricité qui traverse en une seconde chaque section du circuit. Par suite, le nombre d'ampères qui exprime l'intensité d'un courant indiquera aussi la quantité d'électricité qui passe en une seconde : 1 ampère est donc l'unité de quantité électrique transportée par le courant en une seconde. Cette unité de quantité reçut d'abord, en Angleterre, le nom de *weber*, et le courant d'intensité 1 s'appelait un courant de 1 *weber par seconde;* le courant avait pour valeur I s'il transportait I *webers* par seconde. Aujourd'hui on fait une distinction entre la puissance du courant et la quantité d'électricité transportée, bien que cette quantité soit proportionnelle à la puissance du courant. En d'autres termes, le courant d'une intensité de I ampères transporte, en une seconde, I unités de quantité qu'on pourrait désigner par le mot *webers*. Toutefois, le Congrès de Paris de 1881 a adopté pour cette unité le

nom de *coulomb* au lieu de *weber*, ou plutôt il a changé l'ancien *weber* en *ampère* et en *coulomb*, de telle sorte que le courant dit de 1 *weber par seconde* est maintenant le courant d'*un ampère qui transporte un coulomb par seconde.*

XXVIII. — COULOMB, UNITÉ TECHNIQUE DE QUANTITÉ.

Des définitions précédentes il résulte que le coulomb est *la quantité d'électricité* transportée en une seconde par un courant d'une force de 1 ampère. La formule générale

$$Q = tI$$

donne

$$1 \text{ coulomb} = 10^{-1} \text{ U.E.M. } [Q] \text{ C.G.S.},$$

et aussi (§ XIX)

$$1 \text{ coulomb} = 3 \times 10^{9} \text{ U.E.S. } [q] \text{ C.G.S.}$$

Si l'on se reporte à la valeur et à la définition de l'ampère, on voit que le coulomb est la quantité d'électricité repoussée en une seconde par *un* volt à travers une résistance de *un* ohm. Cette unité présente un réel intérêt, et il était essentiel de distinguer l'intensité et la quantité d'électricité qui traverse un circuit; par suite de cette distinction nous pouvons dire, par exemple, que si le passage de 1 coulomb décompose p grammes d'un électrolyte, le passage de n coulombs en décompose np grammes.

Le professeur Pinto a fait observer, avec raison, que le nom de *coulomb* donné à l'unité technique E.M. pourrait induire en erreur et faire croire au premier abord que cette unité se rapporte à la loi qu'on appelle *loi de Coulomb*, et qui est exprimée par l'équation $f = \frac{qq'}{d^2}$. Or, il résulte de nos définitions qu'aucun rapport n'existe entre cette unité et la loi qui porte le même nom, puisque l'expression de *coulomb* se rapporte à l'équation $Q = tI$. C'est, comme l'a dit Willougby Smith, par un sentiment de courtoisie à l'égard des savants français et par esprit de conciliation, que l'on s'est décidé à

sacrifier l'ancienne appellation créée en l'honneur de Weber [1].

CONDENSATEUR CHARGÉ D'UN COULOMB. — Pour nous faire une idée de la quantité d'électricité que représente 1 coulomb, nous supposerons qu'on puisse recueillir cette quantité tout entière dans un condensateur, et nous calculerons les dimensions que celui-ci devrait avoir. A cet effet nous emploierons la formule connue

$$M = \frac{k\,SV}{4\pi e},$$

où nous poserons $M = 1$ coulomb $= 3 \times 10^9$ unités électrostatiques de quantité.

On suppose que le condensateur est chargé à un potentiel maximum V de 300 unités électrostatiques et formé de feuilles d'étain séparées par du papier paraffiné de pouvoir inductif $k = 2$ et d'épaisseur $e = 0^c,03$. Dans ce cas,

$$S = \frac{4\pi e M}{kV} = \frac{4 \times 3,1416 \times 0,03 \times 3 \times 10^9 \text{ cent. car.}}{2 \times 300} = 188^{mq}.$$

c'est-à-dire un carré de 14^m de côté à peu près.

XXIX. — FARAD, UNITÉ TECHNIQUE DE CAPACITÉ.

C'est la capacité d'un conducteur qui contient 1 *coulomb quand on le charge au potentiel de* 1 *volt,* ou, comme l'a défini le Congrès de Paris [2], *c'est la capacité d'un condensateur dans lequel la charge de* 1 *coulomb produit entre les armatures une différence de potentiel de* 1 *volt.* On voit encore que l'*unité* de capacité est celle d'un condensateur contenant 1 *coulomb, l'armature intérieure ayant un potentiel de*

---

[1] L'ancienne dénomination de *Weber* avait le grave inconvénient de représenter à la fois deux unités différentes : l'unité d'intensité et l'unité de quantité. Il en résultait une grande confusion dans le langage. *C'est pour faire disparaître toute ambiguïté que le Congrès a tenu à supprimer le nom de Weber.* P. M.

[2] *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences,* Paris, 3 octobre 1881.

1 *volt et l'armature extérieure le potentiel zéro.* Aussi pouvons-nous dire (avec Preece) que « la capacité se mesure par la quantité d'électricité que le conducteur peut contenir dans des conditions données, de même que l'on mesure la capacité d'un vase par la quantité de liquide qu'il renferme ».

De la formule connue $q = ce$, on tire

$$1 \text{ coulomb} = 1 \text{ farad} \times 1 \text{ volt},$$

par conséquent

$$1 \text{ farad} = 10^{-9} \text{U.E.M.}[\text{C}]\text{C.G.S.}$$

ou (§ XIX)

$$1 \text{ farad} = 9 \times 10^{11} \text{U.E.S.}[\text{C}]\text{C.G.S.}$$

Cette unité de mesure est trop grande pour la pratique. On verra plus loin, en effet, que le volume tout entier du globe terrestre a une capacité inférieure à 1 farad et égale à 707 millionièmes de farad. C'est pour cette raison que l'on prend en réalité pour unité technique de capacité le millionième de farad appelé *microfarad :* 1 microfarad vaudra 9×10^5 unités U.E.S.

Une sphère dont la capacité est 1 microfarad doit, d'après le § XIV, avoir un rayon de

$$9 \times 10^5 \text{ cent.} = 9^{\text{km}}.$$

CONDENSATEURS D'UNE CAPACITÉ DE 1 FARAD. — Dans un condensateur quelconque, la charge est exprimée par

$$M = \frac{kSV}{4\pi e} = CV,$$

d'où

$$C = \frac{kS}{4\pi e}.$$

Si nous voulons déterminer la surface d'un condensateur ayant une capacité de 1 farad, nous poserons

$$1 \text{ farad} = \frac{kS}{4\pi e},$$

d'où

$$S = \frac{4\pi e \times 9 \times 10^{11} \text{ cent. carrés}}{k}.$$

Si le condensateur est formé de feuilles de mica ayant une épaisseur e de $0^c,025$ et une capacité inductive k égale à 5, on aura

$$S = \frac{4 \times 3,1416 \times 0,025 \times 9 \times 10^{11}}{5} = 565488000000^{cq}.$$

La surface correspondant à une capacité de 1 microfarad serait

$$S = 56549^{cq} = 5^{mq},65.$$

Les étalons de microfarad qu'on trouve dans le commerce sont formés de 300 feuilles d'étain séparées par des lames de mica et contenues dans des boîtes de 8^c de hauteur et de 16^c de diamètre. Leur surface sera donc à peu près égale à

$$8^2 \times 3,1416 \times 300 = 6^{mq},$$

nombre peu différent du précédent.

XXX. — MULTIPLES ET SOUS-MULTIPLES DES UNITÉS TECHNIQUES.

On a formé des multiples et des sous-multiples de toutes les unités techniques, en les multipliant et en les divisant par 1 million. On indique les multiples par le préfixe *méga* (en grec, μέγα), comme nous l'avons déjà vu pour la dyne, et les sous-multiples par le préfixe *micro* (en grec, μικρόν). Ainsi, par exemple, on emploie fréquemment les expressions

$$\begin{aligned} 1 \text{ mégohm} &= 10^6 \text{ ohms} = 10^{15}[R], \\ 1 \text{ microhm} &= 10^{-6} \text{ ohms} = 10^3[R], \\ 1 \text{ microfarad} &= 10^{-6} \text{ farads} = 10^{-15}[C]. \end{aligned}$$

XXXI. — LES UNITÉS TECHNIQUES DÉRIVENT DIRECTEMENT DES UNITÉS FONDAMENTALES,

$$L = \text{quart du méridien terrestre}, \; M = G \times 10^{-11}, \; T = S \; (^1).$$

Comparons la valeur de l'ohm $= 10^9 [R]$ avec l'expression générale de l'unité de résistance

$$[R] = [LT^{-1}].$$

---

(1) Dans un système cohérent d'unités, les unités primaires seules sont absolues; les unités secondaires déduites des premières par voie de multiplication ou de division ne font pas partie du système.

Lorsqu'on a abandonné les unités électromagnétiques primaires pour adopter les unités secondaires, ohm, volt, ampère, coulomb, farad, watt, mieux appropriées aux besoins de la pratique, on est sorti du système absolu C.G.S. Mais ces unités font partie d'un autre système absolu de base différente.

Pour constituer ce nouveau système d'unités, on a pris arbitrairement deux d'entre elles, et l'on a déterminé les autres d'après les équations électriques. Supposons que l'on se donne, par exemple, l'ohm et l'ampère :

1 ohm $= 10^9$ unités électromagnétiques absolues de résistance.
1 ampère $= 10^{-1}$ unités électromagnétiques absolues de courant.

La loi de ohm $E = RI$ fournit la valeur de l'unité de potentiel :

Unité de force électromotrice = unité de résistance × unité de courant,

et l'on voit que, si l'unité de résistance devient 10^9 fois plus grande que l'unité absolue de résistance C.G.S., et l'unité de courant 10 fois plus petite que l'unité absolue de courant C.G.S., le produit de ces unités, c'est-à-dire l'unité de force électromotrice, se trouvera 10^8 fois plus grande que l'unité absolue de force électromotrice C.G.S.

Ensuite la loi de Faraday, $Q = It$ donne, pour l'unité de quantité d'électricité,

unité de quantité = unité de courant × unité de temps.

Si l'unité de temps n'est pas changée, la nouvelle unité de quantité ou coulomb, vaudra 10^{-1} unités absolues de quantité C.G.S.

De la formule des condensateurs, $Q = CE$, on déduit

$$\text{unité de capacité} = \frac{\text{unité de quantité}}{\text{unité de potentiel}}.$$

L'unité pratique de capacité, ou farad, vaudra donc $\frac{10^{-1}}{10^8} = 10^{-9}$ unités absolues de capacité C.G.S.

La loi de Joule $W = I^2Rt$ détermine la valeur de l'unité pratique du tra-

Il est évident que, si l'unité L de longueur devient égale à 10^9 centimètres, l'unité [R] se convertit en ohm.

Transportons cette nouvelle unité de longueur (10^9 centimètres) dans la valeur générale de la force électromotrice

$$[E] = \left[L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}\right],$$

et calculons la valeur de M qui fournit pour [E] la valeur de 1 volt (10^8), T conservant sa valeur ordinaire de *une* seconde; on doit avoir

$$(10^9)^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} = 10^8,$$

d'où

$$M = 1^{gr} \times 10^{-11}.$$

Ainsi, dans le système

$$L = 10^9 \text{ centimètres}, \quad M = 1^{gr} \times 10^{-11}, \quad T = 1^s,$$

---

vail, ou watt :

unité de travail = (unité de courant)^2 × unité de résist. × unité de temps.

Par suite, le watt sera $10^{-2} \times 10^9 = 10^7$ fois plus grand que l'unité absolue de travail C.G.S. Tel sera le travail produit en 1 seconde par un courant de 1 ampère dans un circuit de 1 ohm.

Les unités pratiques ainsi déterminées font partie d'un système absolu. Quelle est la base du système?

Les dimensions de la résistance, en mesure électromagnétique, sont

$$[R] = [LT^{-1}].$$

Si l'unité de résistance devient 10^9 fois plus grande, l'unité de temps restant la même, l'unité de longueur doit devenir 10^9 fois plus grande, c'est-à-dire être 10^9 centimètres.

On fixera d'une manière analogue la grandeur de la nouvelle unité de masse, en considérant une équation de dimension dans laquelle entre la masse et l'on trouvera pour la nouvelle unité la valeur 10^{-11} grammes-masse.

La base du système pratique sera donc :

$$L = 10^9 \text{ centimètres},$$
$$M = 10^{-11} \text{ grammes-masse},$$
$$T = 1 \text{ seconde}.$$

Habituellement on désigne le centimètre par C, le gramme-masse par M, et la seconde par S; de même que le système centimètre-gramme-seconde se représente en abrégé par les lettres (C.G.S.), le système pratique pourrait se représenter symboliquement par (10^9C. 10^{-11}M. S.). P. M.

les unités de résistance et de force électromotrice sont respectivement 1 ohm et 1 volt. A ce système appartiendront toutes les unités techniques, puisque toutes sont composées avec l'ohm et le volt. Remarquons maintenant que 10^9 centimètres valent 10 millions de mètres, c'est-à-dire la mesure vulgaire d'un quart du méridien terrestre; on peut, par conséquent, dire que les unités techniques, ohm, volt, etc., dérivent d'une façon directe des unités fondamentales

Longueur = quart du méridien terrestre (10^9 centimètres),
Masse $= 1^{gr} \times 10^{-11}$,
Temps $= 1^s$.

XXXII. — WATT, NOUVELLE UNITÉ TECHNIQUE ABSOLUE DE TRAVAIL, ET JOULE.

Dans le nouveau système d'unités fondamentales que nous venons d'indiquer, l'unité de travail sera

$$W = [L^2MT^{-2}] = (10^9)^2 \frac{1}{10^{11}} = 10^7 \text{ ergs.}$$

Cette nouvelle unité reçut, en 1882, sur la proposition de M. W. Siemens, le nom de *watt*.

Ainsi

$$1 \text{ watt} = 10^7 \text{ ergs.}$$

Si l'on substitue les valeurs de l'erg trouvées plus haut (§§ IX et X), on aura

$$1 \text{ watt} = \begin{cases} \frac{1}{9,81} \text{ kilogr} & = 0^{kgm},102, \\ \frac{10^5}{9,81} \text{ gr. centim.} & = 102 \times 10^2 \text{ gr.-centim.}, \\ \frac{1}{735,46} \text{ chev. vap. de } 75^{kgm} & = \frac{136}{10^5} \text{ chev. vap. de } 75^{kgm}, \\ \frac{1}{746} \text{ horse-power } (76^{kgm}) & = \frac{134}{10^5} \text{ horse-power;} \end{cases}$$

$735^{watts},5$ font 1 cheval de 75^{kgm}.

746 watts font 1 cheval anglais (horse-power).

Rappelons que l'équivalent mécanique de la calorie-gramme (§ XI) est

$$J = 4,2 \times 10^7 \text{ ergs} = 1 \text{ cal.-gramme};$$

nous pourrons poser aussi

$$J = 4^{\text{watts}},2 = 1 \text{ cal.-gramme},$$

d'où

$$1 \text{ watt} = \frac{1 \text{ cal.-gramme}}{4,2} = 0^{\text{cal. gr.}},24.$$

La quantité de chaleur représentée par $0^{\text{cal. gr.}},24$ reçut de quelques savants, et particulièrement des Anglais, le nom de *Joule*. Mais le symbole J ayant été adopté pour indiquer l'équivalent mécanique de la calorie-gramme, c'est-à-dire $4^{\text{watts}},2$, la dénomination de Joule donnée à la fraction $0^{\text{cal. gr.}},24$ établirait une confusion et doit être rejetée.

Le watt est une mesure mécanique qui peut servir pour toutes sortes de travaux; cependant elle est spécialement appliquée aux calculs d'énergie électrique faits avec les unités techniques volt, ampère, etc., parce que les travaux estimés au moyen de ces unités se trouvent nécessairement et directement exprimés en watts, le watt appartenant au même système de mesures que le volt, l'ampère, etc. Pour le démontrer, reprenons les formules (§§ XVII et XIX) qui donnent la valeur du travail accompli par le courant en une seconde,

$$W = EI = I^2R = EQ = E^2C.$$

En posant $R = 1$ ohm, $E = 1$ volt, $I = 1$ ampère, etc., et en substituant ensuite à ces unités leurs équivalents en unités simples, on obtient pour W le résultat constant 10^7 ergs ou 1 watt. On a donc

$$\text{Unité technique de travail} \left\{ \begin{array}{lll} 1 \text{ volt} \times 1 \text{ ampère} & = 10^8 \times 10^{-1} & = 10^7 \text{ ergs} \\ (1 \text{ ampère})^2 \times 1 \text{ ohm} & = (10^{-1})^2 \times 10^9 & = 10^7 \text{ ergs} \\ 1 \text{ volt} \times 1 \text{ coulomb} & = 10^8 \times 10^{-1} & = 10^7 \text{ ergs} \\ (1 \text{ volt})^2 \times 1 \text{ farad} & = (18^8)^2 \times 10^{-9} & = 10^7 \text{ ergs} \end{array} \right\} = 1 \text{ watt.}$$

Les première et troisième expressions nous fournissent encore les deux définitions suivantes :

1 *watt est le travail accompli par l'unité de courant* (1 *ampère*) *lorsqu'elle est repoussée par l'unité de force électromotrice* (1 *volt*) *ou lorsqu'elle éprouve une chute de potentiel de* 1 *volt;*

1 *watt est le travail fait par* 1 *coulomb tombant de la hauteur de* 1 *volt.*

Si nous désignons le watt par l'expression *coulomb-volt,* nous créerons une dénomination parfaitement analogue au mot *kilogrammètre,* et aux autres termes semblables.

Bien que le mot *watt* soit fréquemment usité aujourd'hui, on emploie souvent à sa place l'expression *volt-ampère,* ou plus simplement V — A, ou même, lorsque le calcul est fait avec d'autres unités, les initiales V — C, A — O, etc. de ces unités.

Au Congrès international des Électriciens, M. Preece s'exprimait ainsi au sujet du watt (1) :

« En se développant, l'électricité rencontre des résistances sur son parcours ; elle accomplit un travail sur la matière à travers laquelle elle passe et peut produire de la chaleur et de la lumière. Ce travail dépend du courant qui passe et de la force électromotrice. Si l'on multiplie la force électromotrice par le courant, on obtient la mesure de l'énergie employée. Ainsi 1 *volt* $\times$ 1 *ampère* $=$ 1 *watt,* qui est l'unité de travail électrique; 746 watts constituent la force de 1 cheval; on a donc un moyen très facile de convertir l'expression de l'énergie électrique en celle de la force mécanique, et réciproquement, Une lampe à incandescence est alimentée par 105 volts environ et $0^{amp},8$; elle dépense donc $105 \times 0,8 = 84$ watts, un peu plus de $0^{cheval},1$.

» Toutes ces unités, à l'exception du watt, ont été choisies par le Congrès des Électriciens, à Paris, en 1881, et adoptées par le monde entier. C'est le résultat le plus remarquable de l'Exposition de Paris, qui fera époque dans l'histoire de l'Électricité. »

(1) Journal italien *Il Telegrafista,* t. III, p. 38; 1883.

APPLICATIONS
DES THÉORIES PRÉCÉDENTES
A DIFFÉRENTS PROBLÈMES.

XXXIII. — CAPACITÉ DES CABLES SOUS-MARINS.

La capacité d'un condensateur cylindrique, dont l'armature extérieure est à la terre, est donnée en unités électrostatiques par la formule

$$c = \frac{0,4343 \times kl}{2 \times \log \text{vulg.} \frac{R}{r}},$$

ou k représente le pouvoir inducteur spécifique de l'enveloppe isolante, l la longueur du cylindre, $\frac{R}{r}$ le rapport du rayon extérieur du diélectrique au rayon du conducteur métallique qui y est contenu.

Or les câbles sous-marins sont de véritables condensateurs cylindriques qui mettent un temps appréciable pour se charger graduellement d'une extrémité à l'autre. Les fils conducteurs forment l'armature intérieure; la couche isolante est constituée par la gutta-percha ou quelque autre matière isolante; enfin la couverture de fils de fer et l'eau de mer qui peut pénétrer jusqu'au diélectrique forment l'armature extérieure. On peut donc employer pour les câbles sous-marins la formule précédente; pour obtenir la capacité en microfarads, on divisera cette expression (§ XXIX) par 9×10^5, ce qui donne

$$c = \frac{0,4343 \times kl}{2 \times 9 \times 10^5 \log \text{vulg.} \frac{R}{r}} \text{ microfarads};$$

si l'on prend pour l la longueur de 1 *mille marin* (appelé *nœud* ou *knot*) [1], qui vaut 1852^m ou 185200^c, on a

$$c = \frac{0,0447 \times k}{\log \text{vulg.} \frac{R}{r}}.$$

Supposons

$$R = 4^{mm},04, \quad r = 1^{mm},84,$$

d'où

$$\frac{R}{r} = 2,1956$$

et

$$\log \text{vulg.} \frac{R}{r} = 0,3415532,$$

Avec les isolants suivants, on a :

		Capacité par nœud.
Caoutchouc de Hooper	($k = 3,1$).....	0,45 microfarads
Gutta-percha	($k = 4,2$).....	0,55 »
Gutta de W. Smith	($k = 3,59$).....	0,47 »

Le professeur F. Jenkin, qui cite spécialement quatre câbles différents pour lesquels les valeurs de $\frac{R}{r}$ sont comprises entre 2,92 et 3,48, observe que la capacité d'un grand nombre de câbles sous-marins est d'environ 0,33 de microfarad par nœud.

XXXIV. — CAPACITÉ DU GLOBE TERRESTRE.

Le rayon du globe terrestre peut être considéré comme sensiblement égal à

$$\frac{4\,000\,000\,000^c}{2\pi};$$

---

[1] Le *nœud* ou *mille marin* est par définition la longueur de l'arc du méridien qui correspond à la *minute géographique*, c'est-à-dire à l'angle de 1 minute dont le sommet serait au centre de la Terre. En raison de l'aplatissement du globe vers les pôles, un angle au centre de 1 minute ne sous-tend pas des arcs de méridien égaux à toutes les latitudes.

C'est pour cette raison que le *mille marin anglais* (*knot* ou *nautical mile*) vaut 1854^m, et le *nœud* ou *mille marin français* 1852^m. P. M.

ce sera en mesure E.S. la valeur même de sa capacité, et, si nous convertissons ce résultat en microfarads, nous aurons (§ XXIX)

$$\frac{4 \times 10^9}{2\pi \times 9 \times 10^5} \text{ microfarads} = 707 \text{ microfarads.}$$

Si l'on admet pour les câbles sous-marins une capacité moyenne de $0^{\text{microfarad}},4$ par nœud, il faudrait, pour former une capacité égale à celle du globe, environ 1770 milles (de 1852^{m}) de câble sous-marin.

Une sphère aurait une capacité de 1 farad si elle avait un rayon égal à

$$\frac{1\,000\,000}{707} = 1400 \text{ fois celui de la Terre.}$$

Le Soleil même, dont le rayon est 100 fois seulement celui de la Terre, n'aurait pas une capacité de 1 farad, mais seulement de $\frac{1}{14}$ de farad environ.

XXXV. — ÉQUIVALENTS ÉLECTROCHIMIQUES DES DIFFÉRENTS CORPS POUR UN COULOMB.

Nous appelons *équivalents électrochimiques* les poids des divers corps que fournit par électrolyse en une seconde un courant d'intensité 1. Selon que l'intensité est évaluée en unités simples E. M. ou en ampères, les équivalents électrochimiques diffèrent. Pour nous conformer aux habitudes modernes, nous supposerons le courant évalué en ampères et nous dirons que *les équivalents électrochimiques sont les poids des diverses matières que donne par électrolyse en une seconde un courant de* 1 *ampère* (voir ci-après les autres definitions).

Dans ces évaluations on prend pour base un phénomène quelconque de décomposition; car, suivant la loi connue de Faraday, les équivalents électrochimiques des corps seront directement proportionnels aux valeurs de leurs équivalents chimiques. On doit remarquer pourtant que ces derniers représentent simplement les rapports numériques suivant les-

quels les différents corps se combinent, tandis que les équivalents électrochimiques sont des quantités déterminées de matière, ayant des valeurs absolues qui dépendent seulement de la définition de l'unité de courant.

Suivant l'évaluation le plus communément adoptée, 1 ampère qu'on fait passer à travers de l'eau met en liberté en une seconde

$$0^{gr},0000104 \text{ d'hydrogène.}$$

L'équivalent électrochimique d'un corps quelconque, dont l'équivalent chimique est q (par rapport à l'hydrogène), sera donc en général

$$\varepsilon = 0^{gr},0000104 \times q.$$

L'expérience démontre que :

La quantité de matière décomposée est proportionnelle à la quantité totale d'électricité qui la traverse, et est tout à fait indépendante du temps que cette quantité d'électricité emploie pour passer. En s'appuyant sur cette loi, on peut donner une meilleure définition des équivalents électrochimiques et dire que *ce sont les poids électrostatiques des divers corps produits en un intervalle quelconque de temps par le passage de* 1 *coulomb.*

Si l'intensité du courant est de I ampères, c'est-à-dire s'il passe I coulombs en une seconde (I étant quelconque, plus grand ou plus petit que l'unité), on aura en une seconde le produit électrolytique

$$0^{gr},0000104 \times qI,$$

et en t secondes

$$p^{gr} = 0,0000104 \times qIt;$$

ainsi l'équivalent électrochimique d'un corps quelconque s'exprime par

$$\varepsilon = 0,0000104 \times q = \frac{p^{gr}}{It};$$

dans cette équation, p représente le poids que fournit par décomposition, en t secondes, un courant d'intensité I ampères. Cette formule se prête à la solution de diverses ques-

tions, car elle permet de trouver les valeurs de l'une quelconque des quantités ε, p, t, I quand les trois autres sont connues.

Exemples :

(*a*) *Un courant a décomposé en une minute la moitié de* 1^{gr} *d'eau. Quelle est son intensité?*

En faisant le calcul pour le poids d'hydrogène

$$\frac{0^{gr}.50}{9} = 0^{gr},0556$$

mis en liberté, nous aurons

$$I = 0,0556 \times \frac{1}{0,0000104 \times 60} = 89 \text{ ampères.}$$

(*b*) *Un électromoteur a une force électromotrice de* 100 *volts. Quelle quantité d'eau peut-il décomposer en une minute dans un circuit dont la résistance est* 1 *ohm?*

Nous avons

$$I = \frac{E}{R} = 100 \text{ ampères,}$$

et, par suite, l'équivalent de l'eau étant 9, nous aurons

$$p = 100 \times 0,0000104 \times 9 \times 60 = 0^{gr},562.$$

(*c*) *On trouve que, dans* 1 *voltamètre à nitrate d'argent, l'augmentation de poids de la lame négative ou la diminution de poids de la lame positive est de p grammes au bout de t secondes. Combien est-il passé de coulombs?*

Il résulte d'expériences récentes que l'équivalent électrochimique de l'argent est très probablement

$$0^{gr},001118,$$

valeur obtenue en dernier lieu par lord Rayleigh [1] et suffi-

---

[1] Voir *Il Ragguaglio* du prof. A. Roiti, *Sulla Conferenza degli Elettricisti tenuta à Parigi nel* 1884. Rome, typ. Bencini; *Lumière électrique*, 19 avril 1884.

samment en accord avec la valeur $0^{gr},0000104$ adoptée pour l'hydrogène. On aura donc, en général

$$I = \frac{p}{0,001118 \times t} \text{ ampères.}$$

Cette formule fera connaître le nombre de coulombs passés dans le temps t.

Si l'on veut obtenir en une seconde l'équivalent chimique de l'argent, c'est-à-dire 108^{gr}, ou, suivant Stas, $107^{gr},93$, on fait p égal à ces nombres et l'on a la moyenne approchée

$$I = 96500;$$

on dira donc, d'une façon générale, qu'il faut

96500 coulombs

pour précipiter 1 équivalent chimique d'argent, quel que soit le temps employé pour le passage de toute cette somme d'électricité.

XXXVI. — UNITÉS JACOBI, $\frac{\text{DANIELL}}{\text{SIEMENS}}$, AMPÈRE-HEURE.

(*a*) Une unité très commode est l'*unité Jacobi* qui sert, dans les expériences faites sans trop de précision, à donner approximativement la valeur du courant en ampères; elle représente l'*intensité du courant qui, en décomposant l'eau, dégage* 1^{cc} *de gaz tonnant en une minute.*

Dans 1^{cc} de gaz tonnant, l'hydrogène occupe les $\frac{2}{3}$ du volume; sa vitesse est donc (§ V)

$$\frac{2}{3} \times 0^{gr},000\,089\,547 = 0^{gr},000\,059\,698.$$

La soixantième partie de cette masse, qui est l'hydrogène dégagé en une seconde par l'unité Jacobi, divisée par la quantité d'hydrogène donnée par l'ampère en une seconde, donnera le rapport des deux unités

$$\frac{\text{jacobi}}{\text{ampère}} = \frac{0,0000099497}{0,0000104} = 0,09567,$$

ou

$$1 \text{ jacobi} = 0^{\text{amp}},09567,$$
$$1 \text{ ampère} = 10^{\text{jacobis}},45.$$

La valeur de l'équivalent électrochimique de l'eau n'étant pas égale pour tous les expérimentateurs, il en résulte que l'on trouve dans les divers Ouvrages des valeurs assez différentes pour le rapport de l'ampère au jacobi, telles que

$$10,32; \quad 10,52; \quad 10,40; \quad 10,266,$$

nombres donnés respectivement par MM. Hospitalier, Schellen, Blavier, Ferrini.

(*b*) L'unité de courant, généralement désignée par le symbole

$$\frac{\text{daniell}}{\text{siemens}} \quad \text{ou} \quad \frac{\text{daniell}}{\text{U. S.}}$$

se rapporte à la formule connue $I = \frac{E}{R}$; c'est l'intensité d'un courant produit par 1 élément daniell à travers un circuit dont la résistance est 1 siemens : la force électromotrice du daniell établie par cette unité est celle qui, dans ce circuit de 1 siemens, précipite en une heure $1^{\text{gr}},38$ de cuivre ([1]).

Pour avoir le rapport de cette unité avec l'ampère, remarquons que le courant $\frac{\text{daniell}}{\text{U. S.}}$ précipite en une seconde

$$\frac{1^{\text{gr}},38}{60 \times 60} = 0^{\text{gr}},00038333 \text{ de cuivre},$$

tandis que l'ampère donne dans une seconde

$$0^{\text{gr}},0003281 \text{ de cuivre } ([2]).$$

On a ainsi

$$\frac{\text{daniell}}{\text{U. S.}} = \frac{0,00038333}{0,0003281} = 1^{\text{amp}},17$$

([1]) H. Schellen, *Die magn. und dyn.-elektr. Machinen*, 3e édition, § 79. — Hospitalier, *Formulaire*, p. 43; 1884.

([2]) *Lumière électrique*, 19 avril 1884.

et

$$1 \text{ ampère} = 0,855 \frac{\text{daniell}}{\text{U.S.}}.$$

(*c*) On comprend que l'unité ampère-heure indique l'action de 1 ampère pendant une heure : c'est aussi la quantité d'électricité qui traverse un circuit pendant une heure entière, alors que son intensité est 1 ampère; d'où

$$1 \text{ ampère-heure} = 3600 \text{ coulombs}.$$

XXXVII. — ÉQUIVALENT ÉLECTRIQUE : SA VALEUR EN COULOMBS.

On appelle *équivalent électrique* la quantité d'électricité qui produit par décomposition 1 équivalent chimique des corps; d'après la loi de Faraday, l'*équivalent électrique* sera évidemment une quantité fixe et identique pour tous les corps. Sa valeur est donnée par la relation $\varepsilon = 0^{gr},0000104 \times q$ qui montre que, pour produire l'équivalent chimique q, il faut $\frac{1}{0,0000104}$ coulomb. S'il s'agit d'une valeur importante, il convient d'employer quelques décimales de plus; pour le moment et jusqu'à ce que l'ampère légal soit déterminé par rapport au travail électrolytique (§ XXVI), nous conserverons comme valeur approchée le nombre déterminé au § XXXV (*c*), c'est-à-dire

$$\text{équivalent électrique} = 96500 \text{ coulombs}.$$

Avec un nombre double de coulombs, on obtient les produits électrolytiques suivants, qui, bien que très différents les uns des autres, n'en proviennent pas moins du passage de la même quantité d'électricité.

Dans cette Table nous désignerons, suivant l'usage, par le mot *anion* le produit qui se rend à l'électrode positive dite *anode*, et par le mot *cation* le produit qui se porte sur l'électrode négative ou *cathode*, le terme *ion* (pluriel *ions*) s'appliquant aux deux produits de la décomposition.

Électrolyses opérées avec 2^éq électriques. — Table d'Everett.

Substance décomposée.			Poids décomposés.	Poids des produits de la décomposition. Cation.	Anion.
			gr	gr	gr
Eau	»	H^2O	18	2 hydrogène	16 oxygène
Acide chlorhydrique	»	HCl	73	1 hydrogène	71 chlore
Chlorure de potassium	»	KCl	149	78 potassium	71 »
» de sodium	»	NaCl	117	46 sodium	71 »
» d'argent	»	AgCl	287	216 argent	71 »
» de zinc	»	$ZnCl^2$	136	65 zinc	71 »
Protochlorure de fer	Chlorure ferreux	$FeCl^2$	127	56 fer	71 »
Sesquichlorure de fer	» ferrique	Fe^2Cl^6	$108\frac{1}{3}$	$37\frac{1}{2}$ fer	71 »
Sous-chlorure de cuivre	» cuivreux	Cu^2Cl^2	198	127 cuivre	71 »
Protochlorure de cuivre	» cuivrique	$CuCl^2$	$134\frac{1}{2}$	$63\frac{1}{2}$ cuivre	71 »
Protochlorure d'étain	» stanneux	$SnCl^2$	189	118 étain	71 »
Bichlorure (tétrachlorure d'étain)	» stannique	$SnCl^4$	130	59 étain	71 »
Sulfate de zinc	»	»	163	65 zinc	»
Azotate de plomb	»	»	331	207 plomb	»
Azotate d'argent	»	»	340	216 argent	»

Dans le calcul du poids des *ions*, on ne doit pas oublier que c'est l'*anion* ou élément comburant qui règle les proportions de l'analyse lorsque les deux éléments ne sont pas combinés à équivalents égaux [1].

M. Hospitalier, dans son formulaire plusieurs fois cité (p. 47), prend 96000 coulombs pour valeur en nombre rond de l'*équivalent électrique* et donne les résultats suivants :

	Nombre de coulombs nécessaires pour mettre 1gr en liberté.	Poids mis en liberté par 1 ampère-heure en grammes.
Hydrogène	96000	0,0378
Argent	889	4,0824
Cuivre cuivrique	3079	1,1900
Cuivre cuivreux	1540	2,3800
Fer ferrique	6857	0,5292
Fer ferreux	3429	1,0584
Étain stannique	3254	1,1149
Étain stanneux	1627	2,2298
Zinc	2953	1,2283
Plomb	928	3,9041

Les travaux électrolytiques effectués dans divers composés par l'équivalent électrique (96500 coulombs) ont une valeur mécanique très différente, ainsi que l'indiquent les quantités très différentes de chaleur développées dans les combinaisons chimiques qui donnent naissance à ces composés. Il peut sembler étrange qu'une même quantité d'électricité puisse produire des effets si différents. On cessera d'en être surpris, si l'on réfléchit que l'électricité n'est point par elle-même une énergie, mais seulement un *dépositaire*, un *véhicule*, un *dispensateur* de l'énergie qui se dégage dans chaque portion du circuit en raison de la différence des potentiels w, w' des extrémités de chacune de ces portions, et suivant la formule bien connue de Ohm

$$e = w - w' = \mathrm{I} \times r.$$

M. Everett écrivait à ce sujet : « Quand deux électrolytes

[1] E. Becquerel, Emile Reynier, *Piles électriques*; Paris, 1884.

différents sont placés en série dans le même circuit, la quantité d'électricité qui les traverse est la même, bien que l'un puisse diminuer plus que l'autre la force électromotrice du circuit ([1]). » Il existe, comme on le voit, une grande analogie entre ces faits et ceux que présentent les cours d'eau ; tout en conservant un débit constant, ceux-ci, en effet, accomplissent, en divers points, des travaux variables suivant les différentes hauteurs de chutes et consomment ainsi progressivement l'énergie potentielle qu'ils possédaient à la source.

XXXVIII. — EXPRESSION DE L'ÉQUIVALENT ÉLECTRIQUE EN UNITÉS ÉLECTROSTATIQUES.

L'équivalent électrique pour lequel on vient de trouver la valeur de 96500 coulombs correspond, d'après la valeur électrostatique du coulomb [§ XXVIII], à

$$96\,500 \times 3 \times 10^9 \text{ unités E. S. de quantité.}$$

Ce nombre est, à très peu près,

$$300\,000\,000\,000\,000 \text{ U. E. S. de quantité,}$$

c'est-à-dire 3×10^{14} fois la quantité d'électricité qui, concentrée dans une petite sphère, exerce une force de 1 dyne sur une autre petite sphère également chargée et distante de $0^m,01$ de la première.

On voit que la valeur électrostatique de l'équivalent électrique est fort élevée. Citons à ce sujet une expérience remarquable de Faraday. Il avait observé que le courant nécessaire pour décomposer un grain ($0^{gr},065$) d'eau acidulée suffit pour maintenir au rouge un fil de platine de $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre pendant un temps égal à celui qu'avait duré la décomposition de l'eau, c'est-à-dire pendant trois minutes quarante-cinq secondes : il put calculer, de plus, que la quantité d'électricité qu'il faudrait employer pour produire le même effet serait celle que fourniraient 800 000 décharges d'une batterie de 15 bouteilles, ayant chacune 184 pouces carrés ou $1186^{cq},8$

([1]) Journal *Les Mondes;* 28 avril 1883.

de surface et chargées à 30 tours d'une puissante machine électrique. La surface de cette batterie, multipliée par le nombre de décharges, donne

$$15 \times 1186^{cq},8 \times 800\,000^{cq} = 1\,424\,160^{mq}.$$

Pour décomposer 1^{gr} d'eau, il faudrait donc l'électricité contenue dans un condensateur d'environ

22 000 000 mètres carrés,

qui serait porté au haut potentiel de la batterie de Faraday ; ce résultat concorde avec ceux que Becquerel avait obtenus à l'aide d'une méthode différente ([1]).

Ajoutons, avec de la Rive, que, si telle est l'expression de la quantité d'électricité nécessaire pour décomposer 1^{gr} d'eau, on trouvera la même expression pour la quantité d'électricité développée par la combinaison des quantités d'oxygène et d'hydrogène qui produisent 1^{gr} d'eau. Entre les résultats fournis par les expériences de Faraday et de Becquerel et la valeur que nous avons trouvée au § XXVIII pour la surface du condensateur capable de contenir 1 coulomb au potentiel E. S. = 300, il y a un accord assez grand. En effet, nous avons trouvé qu'un pareil condensateur devrait avoir une surface de 188^{mq}; celui qui contiendrait les 96 500 coulombs nécessaires à la séparation de 1^{gr} d'hydrogène aurait donc une surface de $181\,000\,000^{mq}$. Or la décomposition de 1^{gr} d'eau exige le dégagement de $\frac{1}{9}$ de gramme d'hydrogène ; pour décomposer 1^{gr} d'eau, il faut donc un condensateur d'environ $20\,000\,000^{mq}$. Dans des calculs de ce genre, ce résultat offre une concordance suffisante avec le nombre de 22 millions trouvé plus haut.

A ce sujet, de la Rive (*Ouvrage cité*) observe que, si l'on pouvait condenser dans un corps l'équivalent électrique tout entier, c'est-à-dire 96 500 coulombs, pour en effectuer la décharge en un même moment et non par degrés successifs, un seul équivalent électrique serait capable de produire les effets

---

([1]) Gavarett, *Traité d'Électricité*, t. II, p. 150. — De la Rive, *Traité d'Électricité*, t. II, p. 805.

de la foudre. Pour s'en rendre compte, on calculera la force avec laquelle s'attirent $2^{\text{éq}}$ électriques placés, par exemple, à 500^{m} de distance l'un de l'autre. On a, d'après la valeur électrostatique du coulomb,

$$\left(\frac{289\,500 \times 10^{9}}{50\,000^{\text{c}}}\right)^{2} = 3352 \times 10^{16} \text{ dynes}$$

$$= 3352 \times 10^{16} \times \frac{102}{10^{8}} \text{ kgm} = 34\,000\,000\,000\,000^{\text{kgm}}.$$

Deux coulombs d'électricité contraire, et à 500^{m} de distance, s'attirent donc avec une force de plus de 3 billions de kilogrammes.

XXXIX. — RAPPORT ENTRE L'ÉQUIVALENT ÉLECTRIQUE ET LE NOMBRE DES MOLÉCULES.

Pour diminuer la surprise et l'embarras que provoque dans l'esprit la grandeur de ces nombres, il convient de présenter ici les considérations qui suivent :

Une quantité de vapeur d'eau du poids de 9^{gr} occupe, à la pression normale de 76^{c}, un volume (§ V) de

$$1243 \times 9 = 11187^{\text{cc}}.$$

Or, il résulte des calculs de Johnston Stoney que 1^{cc} d'air contient

$$10^{21} \text{ molécules } (^{1}).$$

Il y aura, d'après la loi d'Avogrado, le même nombre de molécules dans 1^{cc} de vapeur d'eau; par conséquent 9^{gr} d'eau contiendront, à peu de chose près, un nombre de molécules égal à

$$11187 \times 10^{21} \text{ ou } 10^{25} \text{ environ.}$$

Or, pour décomposer les 9^{gr} d'eau ou pour développer 1^{gr} d'hydrogène, il faut 96 500 coulombs ou environ 3×10^{14} unités

---

(1) William Crookes, *Sur la matière radiante*. Conférence faite le 22 août 1879; Paris, 1880, p. 37. Maxwell estimait ce nombre à 19×10^{18}. Thomson assure qu'il ne peut dépasser 6×10^{21}.

électrostatiques. Donc, chaque molécule d'eau exige, pour se décomposer, ou développe, pour se former, la faible quantité d'électricité représentée par la fraction

$$\frac{3 \times 10^{14}}{10^{25}} \text{ unité électrostatique,}$$

c'est-à-dire un peu moins de $\frac{1}{33000000000}$ unité électrostatique. Si nous voulons calculer le travail nécessaire pour décomposer une seule molécule d'eau, nous multiplierons ce nombre par $1^{\text{volt}},5$ (§ XLIV) ou par $\frac{1,5}{3 \times 10^2}$ U. E. S. de potentiel, et nous aurons

$$\frac{3 \times 10^{14}}{10^{25}} \times \frac{1,5}{3 \times 10^2} = 15 \times 10^{-14} \text{ erg.}$$

Ces résultats surprennent par leur petitesse autant que les précédents par leur grandeur; mais les uns et les autres cessent d'étonner au même degré si l'on réfléchit à la petitesse infinie des molécules et au nombre presque infini de molécules que renferme un très petit volume.

XL. — TRAVAIL FAIT PAR LE COURANT.

On sait que, dans chaque portion du circuit, le courant est dû à la chute de l'électricité passant d'un niveau ou potentiel plus élevé à un niveau ou potentiel inférieur, de même que dans les cours d'eau le liquide s'écoule en tombant des niveaux plus élevés vers des niveaux moins élevés. On sait aussi que la différence des potentiels entre deux points du circuit, quel que soit le conducteur, n'est autre chose que le travail accompli par l'unité électrique passant de l'un à l'autre de ces points suivant la ligne qui les joint.

Par suite, *la force électromotrice de la pile correspond au travail accompli par l'unité d'électricité dans sa course à travers le circuit entier.*

Appelons E la chute ou différence de potentiel entre les points extrêmes d'une longueur donnée du circuit, et w le

travail accompli par l'unité d'électricité qui passe d'un de ces points à l'autre. Nous poserons

$$w = E.$$

Si l'intensité du courant est I ou s'il passe I unités d'électricité par seconde entre ces mêmes points, nous aurons par seconde un travail

$$w \times I = E \times I,$$

et en t secondes un travail

$$(1) \qquad W = EIt.$$

Comme il est difficile de déterminer la différence de potentiels qui existe entre deux points donnés du circuit, il convient d'employer le plus souvent la formule suivante, que l'on obtient en remplaçant E par sa valeur RI, ce qui donne

$$(2) \qquad W = RI^2 t,$$

formule que l'on a déjà fréquemment rencontrée et qui fut d'abord établie expérimentalement par Joule dans ses recherches sur la quantité de chaleur produite par le courant.

Enfin l'expression connue

$$I = \frac{Q}{t},$$

dans laquelle Q représente la quantité d'électricité écoulée dans le temps t, donne

$$(3) \qquad W = EQ.$$

Ces expressions fournissent la valeur de W en ergs si les facteurs E, I, R, ... sont exprimés en unités absolues simples, électrostatiques ou électromagnétiques, et en watts (volt-ampère) si ces facteurs sont exprimés en unités techniques, volts, ampères, ohms, etc. (§ XXXII).

Si l'on compare l'expression précédente EQ à l'expression $\frac{1}{2}$MV qui donne la valeur du travail de décharge d'un condensateur, on remarque que, à charges et à potentiels égaux, le second travail est moitié du premier. La raison de cette diffé-

rence est claire : le potentiel du courant voltaïque en un point donné du circuit reste toujours le même, tandis que le potentiel V d'un condensateur tend vers zéro et peut, par conséquent, être remplacé par un potentiel moyen et constant $\frac{1}{2}$V. Ainsi, l'écoulement de l'électricité s'opère dans un condensateur qui se décharge, comme l'écoulement de l'eau dans un vase qui se vide; pour la pile l'écoulement électrique se fait comme celui de l'eau qui s'échappe d'un réservoir toujours plein et qui tombe constamment de la même hauteur ([1]).

Il faut remarquer que les lois établies par Riess pour la dé-

---

([1]) Quand on relie les deux armatures d'un condensateur aux pôles d'une pile de force électromotrice E, une quantité d'électricité Q = CE passe dans le condensateur en produisant un échauffement du conducteur; cet échauffement entraîne une perte d'énergie, et l'énergie qui reste s'emmagasine dans le condensateur. Cette énergie disponible est représentée par

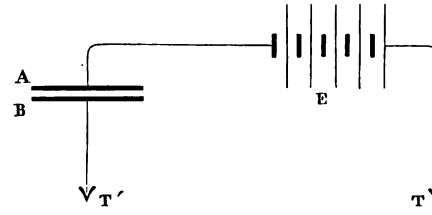
$$W = \frac{1}{2}E^2C$$

ou bien

$$W = \frac{1}{2}EQ.$$

On voit que l'énergie accumulée dans le condensateur, grâce à la charge Q qui lui est donnée par la pile, est la moitié du travail que produirait cette même quantité d'électricité si elle traversait le circuit sans l'interposition du condensateur. L'opération seule de la charge fait donc perdre une moitié de

Fig. 1.



l'énergie qui se dépense sous forme de chaleur ou d'autres travaux. On peut se rendre compte de cette loi de la façon suivante : Relions un pôle de la pile à la Terre T, et l'autre pôle à l'armature A du condensateur, la deuxième armature B étant à la Terre en T'.

Au début, l'armature A étant au potentiel O, la première particule d'électricité qui lui est communiquée par la pile tombe du potentiel E au potentiel O; puis, à mesure que la charge se complète, la différence de potentiel de la pile et du condensateur diminue et tend vers zéro, si bien que la der-

charge des condensateurs conduisent, pour le calcul du travail, aux formules déjà trouvées pour le courant voltaïque. Lorsqu'on admet en effet que toute la décharge s'effectue avec un potentiel moyen constant représenté par V, on a

$$W = MV = CV^2.$$

D'après cette hypothèse, la même quantité d'électricité s'écoule en chaque unité de temps à travers le fil de décharge : si l'on se base sur les effets du courant voltaïque (lois de Ohm) et sur les résultats fournis par diverses expériences, on est fondé à croire que la quantité d'électricité qui se décharge d'un condensateur dans l'unité de temps est en raison directe du potentiel et en raison inverse de la résistance. En désignant par I cette quantité d'électricité qui se décharge dans le temps *un*, par R la résistance du fil de jonction, par t le temps que dure la décharge, on aura

$$I = \frac{V}{R}, \quad M = It.$$

Ces valeurs donnent, pour le travail de la décharge,

$$W = MV = I^2Rt = IVt = CV^2,$$

comme pour le travail du courant voltaïque.

Exemple. — *Une pile se compose de* 10 *éléments Daniell disposés en tension et ayant chacun une force électromotrice de* 1^{volt},1 *et une résistance de* 1 *ohm. Quel est le travail accompli par le courant en une minute dans le circuit extérieur qu'on suppose avoir une résistance de* 5 *ohms?*

---

nière particule d'électricité qui va au condensateur n'éprouve qu'une chute de potentiel infiniment petite.

Le travail effectué par la charge Q, allant de la pile au condensateur, est donc égal au produit de cette charge Q par le potentiel moyen $\frac{E}{2}$

$$W_1 = \tfrac{1}{2}EQ.$$

La charge Q, une fois en équilibre dans le condensateur, possède encore l'énergie disponible

$$W_2 = \tfrac{1}{2}EQ,$$

d'où

$$W_1 = W_2. \qquad [P. M.]$$

Nous aurons

$$I = \frac{1,1 \times 10}{10 + 5} = 0^{amp},733$$

et, par suite,

$$W = (0,733)^2 \times 5 \times 60 = 161^{watts},187$$
$$= 161,187 \times 0^{kgm},102 = 16^{kgm},44.$$

Pour contrôler ce résultat en le rapprochant de la valeur (11 volts) de la force électromotrice, on remarquera que 1 coulomb accomplirait dans le circuit entier un travail de 11 watts en une seconde, et un travail de 660 watts en une minute. La fraction $0^{coulomb},733$ fera donc en une minute dans tout le circuit un travail de

$$0,733 \times 660 = 483^{watts},78.$$

Ce travail se répartit suivant la résistance intérieure ou 10, et la résistance extérieure ou 5; le tiers seulement, c'est-à-dire $161^{watts},2$, passera donc par le fil de jonction : on retrouve le résultat obtenu plus haut.

XLI. — CHALEUR ENGENDRÉE PAR LE COURANT.

Les nombreuses expériences de Joule et de plusieurs autres physiciens établissent que :

1° Un courant d'intensité I engendre dans un fil de résistance R, en un temps t, une quantité de chaleur

$$C = \frac{1}{A} I^2 R t,$$

$\frac{1}{A}$ représentant un coefficient constant et applicable dans toutes les expériences. C'est la *loi de Joule.*

2° La chaleur engendrée par le courant dans les liquides (y compris ceux de la pile) est soumise aux mêmes lois que celle engendrée dans les solides, c'est-à-dire à la formule de Joule.

3° Lorsque le courant accomplit un travail mécanique de L kilogrammètres en dehors du conducteur en faisant mou-

voir par exemple une machine électromagnétique, l'intensité I du courant diminue, et par suite la chaleur C développée dans le conducteur diminue elle-même. Comme on trouve que cette diminution de chaleur correspond à l'équivalent thermique $\frac{L}{430^{kgm}}$ du travail accompli, c'est-à-dire comme il disparaît un nombre de calories tel qu'en le transformant en énergie mécanique on retrouve le travail L, on en déduit que *toute la chaleur développée par le courant est une simple transformation de son énergie mécanique*. Les formules qui donnent la valeur de l'énergie mécanique du courant peuvent donc servir à calculer la quantité de chaleur engendrée par le courant. Il suffira de diviser l'expression du travail par l'équivalent mécanique de la chaleur, c'est-à-dire par $4,2 \times 10^7$ si le travail est donné en ergs et par $4,2$ s'il est donné en watts; on aura en général, en procédant ainsi,

$$C = \frac{I^2 R t \text{ ergs}}{4,2 \times 10^7} \text{ cal.-gramme} = \frac{EI t \text{ ergs}}{4,2 \times 10^7} \text{ cal.-gramme},$$

$$C = \frac{I^2 R t \text{ watts}}{4,2} \text{ cal.-gramme} = \frac{EI t \text{ watts}}{4,2} \text{ cal.-gramme}.$$

Ces expressions sont parfaitement d'accord avec la formule empirique de Joule si l'on prend, dans cette dernière, pour le diviseur A l'équivalent mécanique de la chaleur.

Les produits $I^2 R t$, IEt exprimeraient, sans le secours d'aucun diviseur, la chaleur produite, si l'on prenait pour unités de chaleur les quantités de chaleur qui correspondent aux unités de travail, comme on l'a dit au § XI. Dans ce cas, si les travaux sont exprimés en ergs (ce qui a lieu lorsque I, R, E sont exprimés en unités simples), l'unité de chaleur vaut $\frac{24}{10^9}$ cal.-gramme : s'ils sont exprimés en watts (ce qui a lieu quand I, R, E sont exprimés en ampères-ohms-volts), l'unité de chaleur vaut $0^{\text{cal.-gramme}},24$.

La chaleur constamment renouvelée par le courant que nous supposons continu et non instantané, comme celui de la décharge d'un condensateur, tend à élever de plus en plus la température du conducteur. Mais, comme les rayonnements

vont eux-mêmes en augmentant, d'après la loi de Newton, il arrive nécessairement un moment où l'équilibre se produit entre la chaleur apportée par le courant et celle qui se perd par rayonnement dans le même intervalle de temps. A ce moment la température devient *stable*. Cherchons la valeur approximative de cette température.

Soient

l la longueur en centimètres du fil échauffé par le courant I;

d son diamètre en centimètres, et, par suite, $\frac{\pi d^2}{4}$ sa section en centimètres carrés;

ρ sa résistance (en unités E. M. simples) pour une longueur de $0^m,01$ et une section de $0^{mq},01$, c'est-à-dire sa *résistance spécifique*.

Sa résistance en ohms, calculée en raison directe de la longueur et en raison inverse de la section, sera

$$\rho \times 10^{-9} \times \frac{4l}{\pi d^2};$$

en multipliant cette valeur par I^2 on a le travail en watts : ce dernier, divisé par 4,2, donne le nombre de calories développé dans le fil en une seconde,

$$\frac{\rho \times 10^{-9}\, 4l \times I^2}{4,2 \times \pi d^2} \text{ cal.-gramme.}$$

Désignons par α la fraction de calorie rayonnée par $0^{mq},01$ de la surface en une seconde, lorsque la température dépasse de 1° celle du milieu ambiant. Si l'on admet avec Newton que le rayonnement est proportionnel à la différence θ des températures du corps rayonnant et du milieu ambiant, chaque centimètre carré de surface perd par rayonnement, en une seconde,

$$\theta\alpha \text{ cal.-gramme,}$$

et la surface entière, qui a pour valeur $\pi d \times l$ centimètres carrés, perd

$$\pi d \times l \times \theta\alpha;$$

on peut supposer sans inconvénient, si θ est très grand, que la température du milieu ambiant est zéro.

Lorsque la perte par rayonnement devient égale à la quantité de chaleur développée dans le même temps par un courant que nous supposerons constant, la température du fil demeure fixe. L'équilibre thermique du fil se trouve donc exprimé par l'équation

$$\pi d \times l \times \theta\alpha = \frac{\rho \times 10^{-9} \times 4l \times I^2}{4,2 \times \pi d^2};$$

on en déduit la température maxima et constante θ à laquelle le fil pourra être porté par un courant donné I,

$$\theta = \frac{\rho \times 10^{-9} \times 4 \times I^2}{4,2 \times d^3 \times \pi^2 \times \alpha},$$

ou bien

$$\theta = \frac{965}{10^{13}} \times \frac{\rho I^2}{\alpha d^3}.$$

Cette formule, qui correspond à la formule généralement employée ([1]), conduit à plusieurs conséquences importantes pour lesquelles nous renvoyons au cours de M. Jamin, et sert à résoudre divers problèmes intéressants. Si l'on a besoin, par exemple, de déterminer le courant capable de produire la fusion d'un fil, on donnera à θ une valeur égale à la température de fusion de la matière qui forme ce fil. Suivant Day (Ouvrage cité), la valeur de α est $\frac{1}{4000}$.

Premier exemple. — *Dans l'expérience célèbre que M. Deprez a faite au mois d'octobre* 1882 *pour le transport de la force électrique, entre Miesbach et Munich* (*Bavière*), *dont la distance est* 57^{km}, *la dynamo* (*génératrice*) *de Miesbach avait à ses pôles une différence de potentiel*

$$E = 1343 \text{ volts}$$

et fournissait une intensité de courant

$$I = 0^{\text{ampère}},519.$$

([1]) Jamin, *Cours de Physique*, t. IV, 1er fasc., p. 131. — A. Roiti, *Elem. di Fisica*, § 1033. — R.-E. Day, *La lumière électrique sous forme d'exemples pratiques*, traduit de l'anglais par MM. Foussat et Paul; Paris, 1884.

Le courant émis par Miesbach avait donc une énergie

$$EI = 697 \text{ watts.}$$

Mais une partie de l'énergie totale était absorbée dans l'échauffement de la génératrice même, qui avait une résistance intérieure de $453^{\text{ohms}},1$ *et qui absorbait, par conséquent, pour son propre échauffement*

$$(0,519)^2 \times 453,1 = 122 \text{ watts.}$$

Le travail électrique développé en réalité par la génératrice était

$$697 + 122 = 819 \text{ watts.}$$

La double ligne (aller et retour), formée d'un fil télégraphique de $4^{\text{mm}},5$ de diamètre et de 114^{km} de longueur, offrait une résistance de $950^{\text{ohms}},2$ et la dynamo de Munich une résistance de $453^{\text{ohms}},4$. La perte d'énergie causée par l'échauffement de la ligne entière était donc de

$$\begin{aligned} I^2 R &= (0,519)^2 (453,1 + 950,2 + 453,4) \\ &= (0,519)^2 \times 1856,7 = 500 \text{ watts,} \end{aligned}$$

c'est-à-dire qu'il se perdait par suite de cet échauffement plus de la moitié du courant fourni par la génératrice (¹).

Deuxième exemple. — *Quel diamètre doit-on donner à un fil de plomb placé dans un circuit comme fil de sûreté pour que le courant ne puisse dépasser une valeur de* $7^{\text{ampères}},2$, *ou pour que le courant interrompe de lui-même la communication en fondant le plomb lorsqu'il atteindra la force de* $7^{\text{ampères}},2$?

La température de fusion du plomb est 330°.

En faisant $\theta = 330°$ et $\alpha = \frac{1}{4000}$ dans la formule trouvée ci-dessus, où nous prendrons le diamètre d pour inconnue, nous avons

$$d^3 = \frac{965 \times \rho (7,2)^2 \times 4000}{10^{13} \times 330}.$$

(¹) Du Moncel, *La Lumière électrique*; février 1883.

La valeur de ρ est pour le plomb :

A 0° (§ XLVIII).....	19850
A 300° (§ XLIX) environ.....	44860

Si nous prenons la moyenne 32 000, il vient

$$d^3 = \frac{965 \times 32(7,2)^2 \times 4}{10^8 \times 33} = 0^c,00194,$$

$$d = 0^c,125.$$

En prenant pour ρ la résistance à 0°, on a (*voir* DAY, Ouvrage cité)

$$d = 0^c,106.$$

XLII. — RENDEMENT DES LAMPES ÉLECTRIQUES.

Le *rendement* d'une lampe se mesure, en général, par l'effet lumineux qui correspond à 1 cheval de travail fait par le courant, en considérant le travail effectué dans la lampe seule, ainsi qu'on l'expliquera plus loin.

(*a*) En étudiant le pouvoir éclairant d'une lampe à incandescence alimentée par une série d'accumulateurs, Sir W. Thomson a trouvé les résultats suivants (¹) :

Nombre d'accumulateurs.	Force électromotrice en volts.	Intensité du courant en ampères.	Pouvoir éclairant en bougies angl.
26.....	56,9	1,21	11,6
40.....	87,0	2,10	84,0
46.....	99,1	2,21	114,0

La force électromotrice représente la différence de potentiel entre les extrémités du filament de charbon. Cherchons dans ces trois cas le nombre de bougies qui correspond à une énergie de 1 cheval.

Si l'on emploie l'équivalent du cheval anglais (horse-power) exprimé en watts, on se servira de l'expression (§ XXXII)

$$\frac{IE}{746} \quad \text{ou} \quad IE \times \frac{134}{105} \text{ chev.},$$

(¹) R. FERRINI, *I recenti progressi dell' elettricita ;* Milan, 1884, p. 527.

qui donnera l'énergie de la lampe par minute en chevaux anglais de 76^{kgm} ; on aura alors

$$\begin{array}{c} \text{chev} \\ 0,0923, \\ 0,2448, \\ 0,2935. \end{array}$$

L'effet lumineux correspondant à une force de *un* cheval sera, par suite,

$$\begin{array}{c} \text{bougies.} \\ \dfrac{11,6}{0,0923} = 125, \\ \dfrac{84.0}{0,2448} = 343, \\ \dfrac{114.0}{0,2935} = 388. \end{array}$$

On voit, par ces nombres, que le rendement lumineux s'accroît d'une façon remarquable lorsqu'on emploie des sources énergiques d'électricité.

Pour les lampes Swan du dernier modèle anglais, M. Gordon a trouvé, entre autres valeurs, les résultats suivants :

Force électromotrice.	Intensité du courant.	Résistance du charbon à chaud.	Force en bougies.
volts	ampères	ohms	
102.....	0,65	157	20
100.....	0,66	151,5	20
82.....	0,76	108	20

Appliquons la formule I^2R : nous trouvons d'abord, pour le travail absorbé par la lampe, exprimé en watts,

$$66^{watts},33 ; \qquad 65^{watts},99 ; \qquad 62^{watts},38.$$

Au moyen d'une proportion et en prenant 746 watts pour la valeur du cheval, nous verrons que la lumière correspondant dans ces trois cas à un horse-power est

225 bougies ; 226 bougies ; 240 bougies.

(*b*) Pendant l'Exposition d'Électricité de Paris (1881), on a

fait fonctionner 40 lampes à arc avec un électromoteur à courant continu et constaté les résultats suivants :

Travail mécanique transmis à l'armature de la machine génératrice	$W = 29,96$ chevaux
Résistance intérieure de cette machine	$r = 22,38$ ohms
Résistance extérieure, sans les lampes	$r' = 2,60$ ohms
Intensité du courant	$I = 9,5$ ampères
Différence du potentiel entre les extrémités du charbon dans chaque lampe	$E = 44,3$ volts
Intensité lumineuse sphérique moyenne pour chaque lampe	$l = 39$ carcels

Déterminons, d'après ces données, les autres conditions de l'expérience :

1° Le travail absorbé par chaque lampe est

$$EI = 44,3 \times 9,5 = 420^{\text{watts}},85 = 0^{\text{chev}},57,$$

et le travail absorbé par toutes les lampes est

$$0,57 \times 40 = 22^{\text{chev}},80.$$

2° Le travail électrique du circuit entier, sans les lampes, est

$$I^2(r + r') = (9,5)^2 \times 24,98 = 2254^{\text{watts}},44 = 3^{\text{chev}},07.$$

Le travail total, y compris les lampes, est donc

$$W' = 25^{\text{chev}},87.$$

3° La force électromotrice totale est

$$\begin{aligned} E \times 40 + I(r + r') &= 44,3 \times 40 + 9,5 \times 24,98 \\ &= 1772,0 + 237,3 = 2009^{\text{volts}},3. \end{aligned}$$

4° Le nombre de carcels par *cheval électrique* ou pour un cheval de travail *électrique* est

$$\frac{39 \times 40}{W'} = \frac{1560}{25,87} = 60^{\text{carcels}},3.$$

Le nombre de carcels par *cheval* ou pour un cheval de travail électrique propre aux lampes seules est

$$\frac{1560}{22,80} = 68,4.$$

5° Le rendement mécanique total est

$$\frac{W'}{W} = \frac{25,87}{29,96} = 0,86.$$

(*c*) Voici quelques-uns des résultats fournis par les lampes à incandescence qui figuraient, en septembre 1884, à l'Exposition de Turin. En employant les formules

$$W = I^2 R = EI \text{ watts},$$

on trouve, pour 1 cheval anglais (746 watts), le nombre de bougies qui figure dans la dernière colonne :

Lampe du type	Pouvoir éclairant en bougies angl.	Résistance en ohms.	Courant en ampères.	Force électromotr. en volts.	Pouvoir éclairant par cheval en boug. angl
Edison A.....	32	86	1,18	102	199
» A.....	16	140	0,75	105	151
» A.....	16	121	0,83	100	144
» B.....	8	69	0,75	51	157
» B.....	16	42	1,20	51	195
» C.....	10	208	0,50	202	145
Maxim A.....	16	41	1,38	56	153
» B.....	32	39	1,58	62	243
Swan A.....	11	32	1,22	38	174
Siemens.....	15	105	0,91	95	128
Müller A.....	18	58	1,26	74	145
Cruto.....	8,5	8,16	2,71	22,15	105
Berrstein.....	25 à 30	»	2,50	33 à 34	244
»	50 à 60	»	5,50	25	300
»	50 à 60	»	4,00	33 à 34	306
»	50 à 60	»	2,80	50	293
»	100	»	4,00	50	373

XLIII. — DU RENDEMENT DANS LE TRANSPORT DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE.

Dans le transport de l'énergie par le moyen de deux machines Gramme, ou autres machines analogues, le rendement *électrique* s'évalue par le rapport $\frac{E_2}{E_1}$ des forces électromotrices des deux machines, et le rendement *mécanique* ou *industriel* s'évalue par le rapport des travaux mesurés au *frein* ou au *dynamomètre* sur les deux machines.

M. Deprez a obtenu les résultats suivants, dans une expérience qu'il a faite à Paris, en 1883, aux ateliers du chemin de fer du Nord, avec une ligne de 17^{km} en fil télégraphique de 4^{mm} de diamètre :

Travail moteur mesuré sur la génératrice.	$6,21^{chev}$	
Travail effectif obtenu à la réceptrice...	2,03	
Rendement mécanique.....	2,03	env. 33 p. 100
	6,21	
Rendement électrique.....	$\frac{E_2}{E_1} = \frac{908 \text{ volts}}{1290 \text{ volts}}$	env. 70 p. 100

Dans une autre expérience faite entre Vizille et Grenoble, sur une ligne de 14^{km} en fil de bronze silicieux de 2^{mm} de diamètre, M. Deprez a trouvé les valeurs ci-dessous :

Travail moteur.....	$12^{chev},61$
Travail reçu, mesuré au frein.....	$6^{chev},33$
Rendement mécanique, environ.....	50 pour 100
Rendement électrique $\frac{1737 \text{ volts}}{2848 \text{ volts}}$, environ.....	61 pour 100 (1)

XLIV. — FORCE ÉLECTROMOTRICE NÉCESSAIRE POUR DÉCOMPOSER L'EAU.

1^{gr} d'hydrogène développe, en se combinant avec l'oxygène, 34000 calories-gramme; pareillement 1^{gr} d'hydrogène, précé-

(1) HOSPITALIER, *Formulaire*, p. 240.

demment combiné avec l'oxygène et mis en liberté, absorbe 34000 calories-gramme. Puisque 1 calorie-gramme vaut $4^{\text{watts}},2$ (§ XXXII), il faudra, pour produire 1^{gr} d'hydrogène,

$$34000 \times 4,2 = 142800 \text{ watts.}$$

Le courant I (I étant quelconque, entier ou fractionnaire produit en 1^{s} (§ XXXV) un poids d'hydrogène

$$0^{\text{gr}},0000104 \times \text{I},$$

et, par conséquent, il devra faire en une seconde le travail

$$142800 \times 0,0000104 \times \text{I watts};$$

mais ce travail est exprimé par EI; on devra donc avoir, pour le moins,

$$\text{E} = 142800 \times 0,0000104 = 1^{\text{volt}},5.$$

On en conclut qu'un élément Daniell, dont la force électromotrice vaut à peu près 1 volt (§ XXV), ne produira pas la décomposition de l'eau si celle-ci se trouve à son état normal. Cependant des courants même très faibles traversent l'eau, et à ce passage d'électricité correspondent une séparation et un mouvement en sens contraires des anions et des cations, comme l'a récemment fait observer le professeur Bartoli [1]; il faut admettre qu'il existe au sein du liquide des éléments déjà décomposés, ou des molécules présentant un commencement de dissociation. Cet état de choses serait, suivant Clausius, une conséquence nécessaire du mouvement moléculaire intérieur des liquides, car ce mouvement produit sans cesse entre les molécules des chocs qui dérangent la symétrie de leur structure et déterminent la séparation fréquente de leurs éléments. Ceux-ci se réunissent de nouveau et forment de nouvelles molécules si, après leur mise en liberté, ils viennent à rencontrer des conditions favorables pour leur combinaison. Mais, quand ils se trouvent entre deux pôles électriques de signe contraire, ils s'acheminent vers eux, et servent ainsi au trans-

---

[1] A. Bartoli, *Nuovo Cimento;* mars et avril 1877, janvier et février 1879. *Revue scientifique de Florence;* mars 1879.

port de l'électricité. Dans ce cas, la force électromotrice n'agit pas comme force électrolytique, mais plutôt comme force directrice. Cette explication est confirmée par ce fait, que la résistance des liquides diminue avec l'élévation de la température. En effet, l'agitation moléculaire se trouvant accrue par l'élévation de la température, les effets de dissociation dus aux chocs des molécules devront être augmentés.

XLV. — LA LAMPE A INCANDESCENCE ET LE SOLEIL.

Nous empruntons à un article de Sir W. Thomson, inséré dans le journal italien *le Télégraphiste* (1), un exercice de calcul dans lequel l'activité électrique du charbon d'une lampe à incandescence est comparée à l'activité de la surface solaire.

La base de calcul est un résultat expérimental obtenu par Pouillet à l'aide de son pyrhéliomètre (2) : *Si l'atmosphère terrestre n'absorbait aucune portion de la chaleur envoyée par le Soleil, la quantité qui arriverait au sol serait, pour une surface de* 1^{cq} *et par minute,*

$$1^{\text{cal.-gramme}},7633.$$

Avec cette donnée, on calcule aisément la quantité de chaleur que recevrait en une seconde, la surface d'une sphère ayant pour centre le Soleil et pour rayon la distance du Soleil à la Terre : la chaleur émise en une seconde par la surface solaire aurait évidemment la même valeur. En s'appuyant sur le rapport du rayon moyen de l'orbite terrestre et du rayon du Soleil, on trouve que

1^{cq} de la surface solaire envoie dans l'espace en une minute.....	84888 cal.-gramme
Et en une seconde.....	$1414^{\text{cal.-gramme}},8$

ce qui représente une activité thermique équivalente, pour chaque centimètre carré, à

$$608^{\text{kgm}},364 = 8^{\text{chev}},005 \text{ (H.-P.)}.$$

---

(1) *Il Telegrafista;* Rome, 1883, an. III, p. 109.

(2) Pouillet, *Éléments de Physique,* 7e édit., t. II, p. 707; Paris, 1856.

Cela posé, Sir W. Thomson examine une lampe Swan de 20 bougies, pour laquelle on a les données suivantes :

Courant normal	$1^{amp},4$
Force électromotrice entre les extrémités du charbon	44 volts
Longueur du filament de charbon	$8^{c},89$
Diamètre du filament	$0^{c},0254$

L'activité électrique dans le filament est alors

$$44 \times 1,4 = 61^{watts},6 = \frac{61,6}{746} \text{ chev.} = 0,0825 \text{ chev.}$$

La circonférence d'une section normale du filament est

$$3,1416 \times 0,0254 = 0^{c},0798;$$

la surface totale de ce filament est donc

$$0,0798 \times 8,89 = 0^{cq},709 :$$

ainsi l'activité sera, par seconde et par centimètre carré, égale à

$$\frac{0,0825}{0,709} = 0^{chev},116.$$

En comparant cette valeur à celle de l'activité solaire 8,005 pour une surface égale, on voit que l'activité de la lampe se trouve, à égalité de surface, soixante-neuf fois seulement plus faible que celle du Soleil.

Pour la lampe Swan, dernier modèle anglais, on a :

Courant normal	$0^{amp},7$
Force électromotrice	100 volts
Longueur du filament	$12^{c},7$
Diamètre du filament	$0^{c},013$

Le travail est

$$70 \text{ watts} = 0,0938 \text{ H.-P.}$$

La circonférence de la section normale du filament étant

$$0^{c},0408,$$

on trouve, pour la surface totale du filament,

$$0^{cq},518,$$

et, par suite, l'activité électrique de la lampe par seconde et par centimètre carré est 0,18 H.-P.; à égalité de surface, la lampe possède donc une énergie quarante-quatre fois moindre que celle du Soleil.

XLVI. — FORCE ÉLECTROMOTRICE ET TRAVAIL CHIMIQUE DE LA PILE.

D'après la loi de la conservation de l'énergie, l'énergie dépensée dans une partie du circuit doit se reproduire dans une autre partie de ce circuit. On conçoit donc que le travail de combinaison, qui se fait continuellement dans l'intérieur de la pile (sous l'influence des forces électromotrices de contact), doit être équivalent à la somme des travaux thermiques, électrolytiques, mécaniques, etc., qui se font à travers le circuit entier, y compris la pile elle-même. En résumé, et d'une manière générale, on peut dire que, de même que la chaleur provenant de la combustion du charbon est la source de toutes les énergies qui se manifestent sur les divers organes d'une machine à vapeur, de même la chaleur de combinaison qui se produit dans l'intérieur de la pile est la source de tous les travaux divers que l'électricité peut accomplir sur son circuit. Or l'ensemble de tous ces travaux a pour valeur EI (§ XL) : on déduira donc EI du travail chimique intérieur de combinaison transformé en son équivalent mécanique. Le travail EI devient simplement E si l'on pose $I = 1$, et par conséquent on aura la valeur de la force électromotrice E en cherchant l'équivalent mécanique de l'action chimique correspondant au courant $I = 1$ ou au développement d'un coulomb; pour produire un coulomb, il faut combiner un équivalent électrochimique du métal de la pile. De là, Maxwell tire une définition de la force électromotrice E plus complète et plus pratique que celle du § XL : *La force électromotrice d'un système électrochimique est égale, en mesure absolue, à l'équivalent mécanique de l'action chimique qui se produit sur un équivalent*

électrochimique de la substance. Pour trouver cet équivalent mécanique du travail chimique de combinaison, il suffira de multiplier par l'équivalent mécanique de la chaleur la quantité de chaleur qui serait développée par la combinaison chimique, si elle s'accomplissait librement au dehors de la pile. Mais il ne faut pas oublier (comme le dit Maxwell) que, lorsque l'action chimique alimente un circuit voltaïque, la chaleur développée dans le vase de la pile est moindre que la chaleur due au travail des affinités chimiques, et que la chaleur qui disparaît dans la pile reparaît à l'état de chaleur, ou sous quelque autre forme, dans le circuit extérieur [(*A Treat. on Electr. and Magn.*, § CCLXII [1])].

Désignons par C le nombre des calories-gramme produites par la combinaison d'un équivalent chimique q du métal attaqué dans la pile (par exemple $32^{gr},5$ de zinc); la portion $0,0000104q$ de ce métal qui, en brûlant dans la pile, donne 1 coulomb, développe

$$0,0000104C;$$

---

[1]) Pour mieux saisir ces lois si remarquables, il conviendrait de lire les explications de Maxwell (*Elementary Treatise on Electricity*, § 188 et suivants) dont nous donnons ci-après un extrait :

« Les expériences de Joule ont prouvé que la chaleur développée à travers le circuit électrique tout entier est la même pour une même somme d'action chimique, quelle que soit la résistance du circuit, pourvu qu'aucune autre forme d'énergie, hormis la chaleur, ne soit dépensée au dehors du système.

» Ainsi, quand les électrodes d'une pile sont reliées par un fil gros et court, le courant est très fort et la chaleur est principalement développée dans les vases de la pile; elle ne se produit qu'à un degré bien inférieur dans le fil. Mais, si le fil est long et fin, la chaleur développée dans le fil lui-même est beaucoup plus grande que celle qui se manifeste dans les vases. Si nous tenons compte de la chaleur produite dans le fil et de celle qui s'est développée dans les vases, nous trouvons que la quantité totale de chaleur provenant de la dissolution de chaque grain de zinc est toujours la même.

» Si cependant le circuit comprend un vase dans lequel l'acide dilué soit décomposé par électrolyse en oxygène et hydrogène, la chaleur engendrée dans le circuit par la dissolution de chaque grain de zinc se trouve diminuée de la quantité de chaleur qui serait produite par la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène dégagés dans le vase. De même, lorsque le circuit renferme une machine électromagnétique que l'on fait travailler, la chaleur engendrée dans le circuit est plus faible que la chaleur de combinaison du zinc et la différence est équivalente au travail mécanique effectué par la machine. »

par suite, à un développement de I coulombs ou à un courant de I ampères correspond une production de chaleur

$$0,0000104 \times CI,$$

qui équivaut à un travail de

$$0,0000104\, CI \times J.$$

Si quelque décomposition s'opère en même temps à l'intérieur de la pile, une partie de l'énergie se trouve absorbée et consommée par cette décomposition; c'est encore ce qui a lieu dans le cas où il se produit un travail électrolytique dans une portion extérieure du circuit. Pour cette absorption d'énergie, ou travail passif ou négatif, on aura une expression semblable à la précédente, c'est-à-dire

$$-0,0000104\, C'I \times J.$$

Si l'on suppose EI égal à la somme algébrique des deux travaux, le premier positif, le second négatif, on trouve

$$E = 0,0000104\,(C - C')J.$$

PILE DANIELL. — D'après Thomson, un équivalent chimique de zinc qui se combine avec l'acide sulfurique fournit dans l'élément Daniell

$$C = 53045 \text{ calories-gramme},$$

et la quantité de calories-gramme absorbées par la séparation d'un équivalent de cuivre et de l'acide sulfurique est

$$C' = 27980 \text{ calories-gramme};$$

par suite,

$$C - C' = 25065 \text{ calories-gramme}.$$

D'après M. Berthelot, un élément Daniell varie entre 24 000 et 26000 calories-gramme, suivant la concentration du liquide. On déduit de cette valeur

$$E = 0,0000104 \times 25000 \times 4^{\text{watts}},2 = 1^{\text{volt}},1.$$

PILE BUNSEN. — Dans la pile Bunsen, la réduction de l'acide

nitrique ne consomme que 5043 calories-gramme; par conséquent,

$$E = 0,0000104 \times 48000 \times 4^{\text{watts}},2 = 2^{\text{volts}},1.$$

AUTRES MODÈLES DE PILES. — D'après M. Berthelot [1] :

« Un élément zinc-cadmium, dont chaque métal plonge dans une solution concentrée de son propre sulfate, vaut 8300 calories.

» Un élément zinc-platine, plongé dans l'acide sulfurique étendu, vaut 19000 calories. »

En associant avec les précédents deux éléments Daniell de 24500 calories chacun, M. Berthelot a trouvé l'équation ci-après, sensiblement exacte,

$$2\,(\text{Daniell}) + 1\,(\text{zinc-cadmium}) = 3\,(\text{zinc-platine}).$$

On a, en effet,

$$2 \times 24500 + 1 \times 8300 = 57300,$$
$$3 \times 19000 = 57000.$$

PRIX D'UN WATT OBTENU AVEC LA PILE DANIELL [2]. — La connaissance exacte du travail chimique intérieur de la pile permet de calculer le prix de revient de son énergie. Cherchons le prix de 1 watt obtenu avec la pile Daniell.

Sa force électromotrice étant de $1^{\text{volt}},1$, le travail IE vaudra 1 watt si l'on a

$$I = \frac{1}{1,1} = 0^{\text{amp}},909,$$

c'est-à-dire si $0^{\text{coulomb}},909$ se développe et passe dans le circuit.

Or I coulombs correspondent, dans les travaux intérieurs du daniell, aux poids de combinaison et de décomposition

$$p^{\text{gr}} = 0,0000104 \times q \times I;$$

---

(1) Berthelot, *Sur les limites de l'électrolyse* (*Journal de Physique* de M. d'Almeida, p. 5; 1882).

(2) Extrait d'un Ouvrage de M. E. Reynier, *Piles électriques et accumulateurs;* Paris, 1884.

si l'on prend les équivalents q

Du zinc	32,5
Du sulfate de cuivre	124,7

on aura, en substituant ces valeurs dans l'expression de p et en remplaçant dans la même formule I par sa valeur,

Zinc	$307^{gr} \times 10^{-6}$
Sulfate de cuivre	$1179^{gr} \times 10^{-6}$

On peut admettre que le zinc et le sulfate de cuivre coûtent $0^{fr},60$ par kilogramme. La dépense sera donc

Pour le zinc	$1842^{fr} \times 10^{-10}$
Pour le sulfate de cuivre	7074×10^{-10}
Ensemble	8916×10^{-10}

D'autre part, on recueille un poids de cuivre pur de

$$p^{gr} = 0,0000104 \times 31,7 \times 0,909 = 300 \times 10^{-6};$$

mais on ne doit guère l'évaluer à plus de la moitié de sa valeur, c'est-à-dire à plus de $0^{fr},60$ le kilogramme, pour tenir compte des pertes nombreuses et inévitables qui se produisent; le prix du cuivre recueilli peut donc être estimé à peu près à

$$1800^{fr} \times 10^{-10},$$

et, par suite, la dépense effective est de

$$7116^{fr} \times 10^{-10}.$$

Par suite de nombreuses actions locales qui causent une perte sèche, il faut multiplier cette dépense par 1,5, et même, comme on ne peut utiliser à l'extérieur toute la différence de potentiel de la pile, on doit augmenter cette évaluation de la dépense dans le rapport de 1,3 à 1. En réalité, un watt coûtera, si l'on se sert d'une pile daniell,

$$7116^{fr} \times 10^{-10} \times 1,5 \times 1,3$$

ou

$$13876^{fr} \times 10^{-10}.$$

Un cheval ($735^{watts},46$) coûtera $0^{fr},00102$, et un cheval-heure coûtera

$$0,00102 \times 3600\ (^1) = 3^{fr},67.$$

XLVII. — ORIGINE DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE DES PILES D'APRÈS LA THÉORIE DU CONTACT.

Pour compléter la théorie exposée plus haut, en ce qui concerne la détermination de la force électromotrice, il reste à chercher comment celle-ci prend naissance dans la pile. La théorie du contact, due à Volta, explique complètement les faits, et il nous suffira de rappeler ici les principes généraux de cette théorie, établis sur les preuves les plus solides par l'immortel inventeur de la pile, et confirmés de nos jours par d'illustres électriciens.

1° *Deux corps hétérogènes s'électrisent en sens contraire par le seul effet de leur contact, qui développe entre eux une différence de potentiel déterminée.*

2° *La différence de potentiel due au contact ne change pas, si l'on communique au couple une charge additionnelle de valeur quelconque positive ou négative,* ou si l'on met l'un des éléments du couple en communication avec la Terre; dans ce dernier cas, le second élément prend un potentiel double.

3° *Si l'on forme une chaîne de divers corps, la différence des potentiels du premier et du dernier de ces corps est égale à la somme algébrique de toutes les différences de potentiel qui se produisent entre les corps consécutifs de la chaîne.*

Désignons, en effet, les potentiels successifs par

$$V_1,\ V_2,\ V_3,\ V_4,\ \ldots,\ V_{n-1},\ V_n,$$

(1) *Voir* p. 58.

et leurs différences successives par

$$d_1,\ d_2,\ d_3,\ \ldots,\ d_{n-1};$$

nous aurons

$$\begin{aligned} d_1 &= V_1 - V_2, \\ d_2 &= V_2 - V_3, \\ d_3 &= V_3 - V_4, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ d_{n-1} &= V_{n-1} - V_n, \end{aligned}$$

et, par suite, la somme sera

$$d_1 + d_2 + d_3 + \ldots + d_{n-1} = V_1 - V_n.$$

A l'aide de ces principes, on peut calculer la force électromotrice d'une pile quelconque si l'on connaît, en mesures absolues, les valeurs des différences de potentiel produites par le contact de tous les corps, métaux et liquides, qui constituent la pile. Un grand nombre de ces valeurs ont été déterminées par des expérimentateurs illustres et sont consignées dans l'Ouvrage, plusieurs fois cité, de M. Gordon (1).

Appliquons ces données à la pile Daniell. Entre le cuivre Cu et la dissolution L′ saturée de sulfate de cuivre, se produit par simple contact une différence de potentiel

$$\mathrm{Cu} \mid \mathrm{L}' = +\,0^{\mathrm{volt}},070.$$

Entre la solution L′ et la solution suivante L″ de sulfate de zinc, on a une différence de potentiel

$$\mathrm{L}' \mid \mathrm{L}'' = -\,0^{\mathrm{volt}},095.$$

Entre L″ et le zinc qui plonge dans cette solution,

$$\mathrm{L}'' \mid \mathrm{Zn} = +0^{\mathrm{volt}},430.$$

Enfin entre Zn et Cu,

$$\mathrm{Zn} \mid \mathrm{Cu} = +\,0^{\mathrm{volt}},750.$$

(1) Gordon, *Ouvr. cit.*, t. II, chap. XLIII, trad. française, p. 471 et suiv.

D'après le troisième principe, la différence de potentiel aux pôles est

$$0,070 - 0,095 + 0,430 + 0,750 = 1^{\text{volt}},555.$$

Ce résultat diffère peu de la valeur obtenue directement, et la théorie voltaïque trouve dans cet accord une précieuse confirmation. Le travail chimique intérieur est l'équivalent de l'énergie du courant; mais les différences de potentiel qui donnent naissance au courant sont produites par le simple contact.

XLVIII. — RÉSISTANCES ÉLECTRIQUES DES DIVERS CORPS EN MESURES ABSOLUES.

Prenons un cube de $0^{m},01$ de côté d'une substance quelconque, et supposons que le courant le traverse perpendiculairement à ses faces. La résistance que la matière de ce cube oppose au passage de l'électricité s'appelle *sa résistance spécifique*. On voit que celle-ci est *la résistance d'une substance donnée ayant une longueur de* $0^{m},01$ *et une section de* 1^{cq}.

Nous donnons ci-après les valeurs de quelques résistances spécifiques indiquées par M. Gordon (1). La Table I contient dans la colonne A les valeurs tirées d'un Mémoire de M. Jenkin, et dans la colonne B d'autres valeurs calculées par le professeur A. Emo, d'après les recherches les plus récentes d'habiles expérimentateurs (2). La Table II est extraite d'un Mémoire de MM. Ayrton et Perry; la Table III, des œuvres de Maxwell; la Table IV renferme quelques valeurs données par M. Cazin (3).

---

(1) Gordon, *Ouvr. cit.*, t. I, p. 547.

(2) A. Emo, *Memoria sulle resistenze elettriche* (*Rivista scientifica*; Florence, 1884). Le journal *Il Telegrafista* donne d'autres résultats obtenus par M. Weiller. Rome, juillet 1884, p. 197.

(3) Cazin, *Traité des piles*, p. 22; 1881.

Résistances électriques spécifiques à 0° C. *en mesures électromagnétiques simples* C.G.S.

TABLE I.

	A.	B.
Argent recuit	1521	1442
» non recuit	1652	1564
Cuivre recuit	1615	1526
» non recuit	1652	1564
Or recuit	2081	1970
» non recuit	2118	2005
Aluminium recuit	2946	2788
Zinc comprimé	5690	5382
Laiton	»	7808
Platine	9158	8653
Fer recuit	9827	9294
Acier	»	9376
Nickel recuit	12600	11916
Étain comprimé	13360	12636
Plomb comprimé	19850	18758
Antimoine comprimé	35900	33885
Bismuth comprimé	132650	125253
Mercure	96190	94260
Alliage de 2 d'argent et 1 de platine en poids, recuit et non recuit	24660	23277
Argentan (alliage de nickel, zinc, cuivre, dit aussi pacfong, maillechort, neusilber, argent allemand)	21170	19983
Alliage de 2 d'or et 1 d'argent en poids, recuit et non recuit	10990	10394

On voit aisément que la valeur donnée pour le mercure dans la colonne B ferait correspondre 10^9 unités, c'est-à-dire l'ohm, à une colonne de mercure d'une longueur de $106^c,09$ et d'une section de 1^{mm} carré, ce qui est à peu près l'*ohm légal*.

TABLE II.

Mica à 20°, après quelques minutes d'électrisation	.....	$8,4 \times 10^{22}$
Gutta-percha »	.....	$4,5 \times 10^{23}$
Gomme laque »	.....	$9,0 \times 10^{24}$
Matière de Hooper »	.....	$1,5 \times 10^{25}$
Ébonite »	.....	$2,8 \times 10^{25}$
Paraffine »	.....	$3,4 \times 10^{25}$

Le verre est plus résistant que ces divers corps. L'air sec peut être considéré comme ayant une résistance infinie.

TABLE III.

Sélénium à 100° cristallisé	6×10^{13}
Eau à 22° C	$7,18 \times 10^{10}$
Eau avec 0,2 pour 100 d'acide sulfurique	$4,47 \times 10^{10}$
» 8,3 »	$3,32 \times 10^{9}$
» 20 »	$1,44 \times 10^{9}$
» 35 »	$1,26 \times 10^{9}$
» 41 »	$1,37 \times 10^{9}$
Sulfate de zinc et eau $ZnSO^4 + 23H^2O$ à 23° C	$1,87 \times 10^{10}$
Sulfate de cuivre et eau $CuSO^4 + 45H^2O$ à 22° C	$1,95 \times 10^{10}$

TABLE IV.

Graphite	de 24×10^5 à 418×10^5
Coke	43×10^5
Charbon des piles de Bunsen	670×10^5
Ac. azotique à 36° aréom. et 13° C	20560×10^5
Solution saturée de sel marin	61160×10^5

XLIX. — VARIATIONS PRINCIPALES DE LA RÉSISTANCE.

La résistance des métaux augmente considérablement lorsqu'ils ne sont pas parfaitement purs. Ainsi, pour citer un exemple, la résistance du fil de cuivre du commerce, qu'on emploie pour les câbles sous-marins, dépasse d'ordinaire de 5 à 8 pour 100 la résistance du cuivre pur recuit. D'après Latimer-Clark, la résistance du fer employé en télégraphie est sept fois plus grande que celle du cuivre pur (1).

Si l'accroissement de température produit une augmentation de résistance dans les métaux, les alliages métalliques, le sélénium cristallisé, il produit au contraire une diminution de résistance dans les liquides, les corps dits isolants, le diamant, le sélénium amorphe, les filaments des lampes à incandescence. La résistance d'une lampe, qui était à froid de 45 à 150 ohms,

(1) FL. JENKIN, *Élect. et Magnét.*, traduction de MM. Berger et Croullebois, p. 301.

n'était à chaud que de 25 à 75 ohms [1]. Dans les charbons employés pour la lampe à arc, la résistance diminue pareillement avec l'échauffement [2].

Pour calculer l'augmentation de résistance produite dans les métaux par l'échauffement, on emploie généralement la formule

$$1 + at + bt^2,$$

en supposant, d'après Matthiessen,

	a.	*b.*
Pour presque tous les métaux purs....	0,0038240	+ 0,000001260
» le mercure.....	0,0007485	— 0,000000398
» l'argentan.....	0,0004433	+ 0,000000152

Ainsi, par exemple, le cuivre recuit a pour résistance :

A 24°..... $1615(1 + 0,0925) = 1764$
A 100°..... $1615(1 + 0,395\ ) = 2253$

Le plomb à la température de 300°, c'est-à-dire près de son point de fusion, aurait pour résistance

$$19850\,(1 + 1,26) = 44861.$$

M. Arndtsen a trouvé, pour les métaux, le coefficient moyen 0,0036783 (*Mém. cit.* de A. Emo) qui diffère peu du coefficient de dilatation thermique des gaz, $0,00366 = \frac{1}{273}$; ainsi la résistance électrique d'un métal changerait en raison de sa *température absolue* et, à 273° C. environ, elle serait sensiblement doublée.

Dans les alliages, la résistance est presque toujours plus forte que celle des métaux qui les composent et varie peu si l'on change entre certaines limites les proportions de ces métaux. En outre, la variation de résistance due au changement de température est généralement moins sensible dans les alliages que dans les métaux purs. M. Mascart a trouvé, pour les étalons de résistance fabriqués avec du fil d'argentan et construits par M. Siemens, divers coefficients supérieurs à

---

(1) Gordon, *A pract. treat. on elect. Lighting*, p. 66.
(2) Schellen, *Ouvr. cit.*, p. 405. — Hospitalier, *Formulaire*, p. 155.

0,0003; l'argentan de M. Elliot a pour coefficient 0,00028 : celui de l'alliage platine-argent varie de 0,00024 à 0,00027. Celui du platine iridié (§ 24) est 0,001325; il est élevé, mais très constant [1].

La résistance des liquides varie avec la température dans des proportions plus grandes que celle des solides. Elle varie aussi, mais sans suivre des lois bien définies, avec le degré de concentration des solutions; elle diminue d'abord lorsque la richesse de la solution augmente, puis s'accroît à partir d'un certain degré de concentration.

L. — EXPRESSION DE LA RÉSISTANCE D'UN FIL EN FONCTION DE SA LONGUEUR ET DE SON POIDS.

Soient

P le poids total du fil en grammes;
$2r$ le diamètre en centimètres;
Δ le poids spécifique;
l la longueur en centimètres;
ρ la résistance spécifique (§ 48).

Le poids est

$$P = \pi r^2 l \Delta;$$

par suite, la section est

$$\pi r^2 = \frac{P}{l\Delta}.$$

On a, pour la résistance en ohms,

$$R = \frac{\rho}{10^9} \times \frac{l}{\frac{P}{l\Delta}} = \frac{\rho}{10^9} \times \frac{l^2 \Delta}{P}.$$

Prenons pour exemple le cuivre pur recuit à 0°C., pour lequel $\Delta = 8,9$ et $\rho = 1615$; la formule donne

$$R = \frac{1615}{10^9} = 8,9 \times \frac{l^2}{P} = 0,0000144 \times \frac{l^2}{P} \text{ ohms.}$$

---

[1] A. Roiti, *Ragguaglio sulla conferenza degli elettricisti a Parigi;* 1884.

On peut vérifier cette formule sur les données suivantes, extraites d'une Table qu'a dressée M. Gordon [1], et dans laquelle on suppose le fil de cuivre à 24° C.; à cette température, la résistance spécifique du cuivre est 1760, comme l'indique la formule ordinaire (§ 49).

Poids en grammes pour une longueur de 1m.	Résistance en ohms par mètre.	Longueur en mètres pour 1ohm de résistance.	Diamètre du fil en millimètres.
gr	ohm	m	mm
1,7993	0,087320	11,452	0,5080
7,1973	0,021831	45,806	1,0160
15,659	0,010035	99,651	1,4986
28,074	0,0055944	178,750	2,0066
44,087	0,0035637	280,607	2,5146
63,700	0,0024665	405,432	3,0226
102,565	0,0015319	652,784	3,5052
112,298	0,0012794	714,745	4,0132
140,928	0,0011149	896,941	4,4958
174,5751	0,0009000	1111,111	5,0038

LI. — FIL DE BRONZE SILICIEUX ET PHOSPHOREUX.

Ce sont en réalité des fils de bronze, c'est-à-dire formés d'un alliage de cuivre et d'étain; ils tirent leur nom d'une petite quantité de silice ou de phosphore qui entre dans leur composition. Ces fils sont préférables aux fils de fer employés pour les lignes télégraphiques, ainsi qu'aux fils d'acier dont on se sert pour les lignes téléphoniques, car ils possèdent une ténacité plus grande. On en fabrique plusieurs espèces : les uns ont une ténacité plus grande et une conductibilité plus faible; les autres ont une conductibilité plus forte et une ténacité moindre.

Le Tableau suivant donnera une idée des propriétés particulières de ces fils [2] :

---

[1] GORDON, *A pract. treat. on elect. Lighting*, p. 208; 1884.

[2] HENRY VIVAREZ, *Des progrès dans la construction des lignes télégr. et téléph.* Paris.

Fil de 1^{mm} de diamètre.	Résistance à la rupture par millimètre carré.	Résistance électrique par kilomètre en ohms.	Conductibilité rapportée à celle du cuivre.
	kg	ohms	
Cuivre pur	28	20,57	100
Bronze silicieux { télégraphe	45	21,42	96
Bronze silicieux { téléphone	76	64	34
Bronze phosph. téléphon	72	78	26
Fer galvanisé de Suède	36	135,2	16
Acier galvanisé Bessemer	40	156	13
Acier Siemens-Martin	42	166,8	12

Il suffit de jeter un coup d'œil sur ce Tableau pour reconnaître que ces fils possèdent une résistance mécanique très supérieure à celle du cuivre et supérieure même à celle du fer et de l'acier. C'est une qualité essentielle pour les lignes téléphoniques qui forment au-dessus de certaines villes une sorte de filet à mailles serrées, car, pour empêcher tout contact entre ces fils, on est obligé de les tendre fortement.

A l'Exposition d'électricité de Turin, en 1884, la maison Montefiore et Lévy, de Bruxelles, a exposé des fils de bronze phosphoreux de 1^{mm} de diamètre, qui ont :

Une ténacité par millimètre carré de section de	90^{kg}
Un poids kilométrique de	$6^{kg},63$
Une résistance kilométrique de	60 ohms.

Ces fils ont aussi le grand avantage d'être plus légers que le fer pour la même longueur et la même conductibilité électrique. En effet, un fil de fer galvanisé et un fil de bronze silicieux de même longueur auront la même conductibilité si leurs sections sont en raison directe de leurs résistances, c'est-à-dire si leurs diamètres d, d' satisfont à la condition

$$d = d'\sqrt{\frac{135,2}{21,42}} = d' \times 2,51.$$

Un fil de fer de 5^{mm} de diamètre, par exemple, a la même résistance qu'un fil de bronze silicieux de diamètre $d' = 2^{mm}$.

Si nous comparons le fil d'acier au fil silicieux auquel on

donne à dessein une résistance mécanique très grande, en vue des lignes téléphoniques, nous aurons

$$d = d' \sqrt{\frac{166,8}{64}} = d' \times 1,61.$$

Ainsi un fil d'acier de 2^{mm} de diamètre a la même résistance qu'un fil silicieux téléphonique de diamètre $d' = 1^{mm},2$. Ce dernier pèse environ $8^{kg},5$ par kilomètre, tandis que le premier pèse 25^{kg} par kilomètre.

Le câble de la Compagnie française de Paris à New-York, appelé *câble de Pouyer-Quertier,* pèse sous l'eau 450^{kg} par mille marin. Si l'on adoptait pour les grands fonds un câble dont l'âme fût une torsade de bronze silicieux, de même conductibilité, on pourrait réduire le poids, sous l'eau, à 320^{kg} par mille marin. Le premier de ces câbles peut supporter, sans se rompre, 6 ou 7 milles de sa propre longueur; le second câble supporterait 8 ou 9 milles de sa longueur (1).

Pour ces divers motifs, c'est-à-dire en raison de sa grande ténacité, de son faible poids, de son petit volume, de sa petite résistance électrique, le fil de bronze silicieux satisfait mieux que tout autre métal aux exigences de la télégraphie : il permet, en effet, d'augmenter l'espacement des poteaux et d'y établir un plus grand nombre de fils; il convient éminemment à la télégraphie militaire, parce qu'il est plus facile à transporter et à placer sur les appuis. Aussi M. Preece disait : « Les fils de bronze phosphoreux et silicieux, qui commencent à être employés sur une large échelle, constituent des agents de transmission pleins d'avenir.... Une matière douée tout à la fois de ténacité et de légèreté, qui permet à nos poteaux de supporter au moins deux fois plus de conducteurs, est d'un puissant secours pour la Télégraphie (2). »

---

(1) *La lumière électrique,* 28 juin 1884.

(2) Journal *Il telegrafista,* p. 145; an. 1882.

LII. — SECTION A DONNER AUX CONDUCTEURS POUR LE TRANSPORT DE L'ÉNERGIE.

« Lorsqu'on connaît le prix du cheval-vapeur, dit Sir W. Thomson, on peut facilement calculer la quantité de métal à employer pour la fabrication des conducteurs destinés à transporter un courant déterminé, tel que le courant capable d'alimenter une lampe à arc ou le courant de 240 ampères qui suffirait probablement pour amener à New-York, à 300 milles de distance, la force de 2100 chevaux par seconde, recueillie à la cataracte du Niagara (1). » Dans ce passage, Thomson fait allusion au célèbre projet qui a été présenté pour éclairer la ville de New-York au moyen de la force de cette cataracte.

Le problème que Sir W. Thomson s'est posé, et que l'on rencontre souvent dans les applications industrielles de l'électricité, revient à celui-ci :

Connaissant le prix du cheval-vapeur et le prix du métal dont on veut former le conducteur qui transportera l'énergie électrique, déterminer la section à donner à ce conducteur pour établir un système de transmission aussi économique que possible.

---

(1) La cataracte du Niagara, par laquelle le lac Érié se déverse dans le lac Ontario et qui se trouve sur les confins des Etats-Unis et du Canada, est formée de deux chutes séparées.

D'après Maria de Somerville (*Géogr. phys.*, ch. XX) la chute qui se trouve du côté des Etats-Unis a :

Largeur, 343^m; hauteur, 49^m.

Les dimensions de celle qui se trouve du côté du Canada sont

Largeur, 640^m; hauteur, 45^m.

En supposant, avec plusieurs auteurs, qu'il tombe par heure 100 millions de tonnes d'eau, et en admettant que les volumes déversés par les deux chutes sont à peu près proportionnels à leurs largeurs, on a, pour le travail total en kilogrammètres,

$$\begin{aligned} & 36 \times 10^9 \times 49 + 65 \times 10^9 \times 45^{kgm} \\ & = 1715 \times 10^9 + 2925 \times 10^{9\,kgm} \\ & = \frac{4640 \times 10^9}{75 \times 3600} \text{ chevaux par seconde.} \\ & = 17200000 \quad \text{»} \quad \text{»} \end{aligned}$$

Thomson a résolu ce problème de la manière élégante que nous allons indiquer.

Soient

ρ la résistance spécifique (pour une section de 1^{cq} et une longueur de $0^m,01$, suivant la définition) du conducteur, exprimée en ohms;

S la section, exprimée en centimètres carrés;

I l'intensité du courant en ampères.

Nous aurons, pour le travail accompli par le courant en une seconde sur une longueur de $0^m,01$ du conducteur,

$$\frac{I^2\rho}{S} \text{ watts,}$$

correspondant à (§ XXXII)

$$\frac{I^2\rho}{735,5 \times S} \text{ chev. de } 75^{kgm}.$$

Ce travail se convertit en chaleur et peut, par conséquent, être considéré comme perdu. Si nous appelons p le prix de revient, en francs et par seconde, du cheval de travail, nous aurons, par suite de cet échauffement, une perte de

$$\frac{I^2\rho p}{735,5 \times S} \text{ francs par seconde,}$$

et, si le travail dure T secondes par année, la perte annuelle sera, pour $0^m,01$ de longueur du conducteur,

$$\frac{I^2\rho p T}{735,5 \times S} \text{ francs par an.}$$

Désignons par p' le prix en francs de 1^{cc} du conducteur, en sorte que $p'S$ soit le prix de $0^m,01$ de sa longueur : nous devrons porter au compte des pertes le $\frac{1}{20}$ au moins de $p'S$ qui est l'intérêt du capital employé [1].

---

[1] Si l'on veut tenir compte, non seulement de l'intérêt, mais aussi des dépenses d'amortissement du capital et des réparations, on portera au compte des pertes, non $\frac{1}{20}$, mais $\frac{1}{5}$ du capital $p'S$.

Ainsi, la perte totale par centimètre de longueur du conducteur sera au moins

$$\frac{I^2 \rho p T}{735,5 \times S} + \frac{p' S}{20}.$$

Supposant déjà fixées les valeurs de I, ρ, p, T, p' qui dépendent des conditions mécaniques des appareils adoptés et de la quantité du matériel employé, on cherchera quelle valeur de S rend la somme des pertes minimum; on voit en effet que, d'une part, il faudrait un conducteur très fin pour réduire le second terme et que, d'autre part, il faudrait un conducteur très gros pour éviter toute dépense inutile de travail par échauffement. Or, si l'on multiplie entre eux les deux termes qui composent l'expression ci-dessus, on obtient un produit constant, parce qu'il est indépendant de S, qui est la seule quantité variable; donc, en vertu d'un théorème connu, la somme de ces deux termes aura une valeur minimum lorsque ces termes seront égaux. La section qui conviendra le mieux à l'économie générale du système sera donc fournie par l'équation

$$\frac{I^2 \rho p T}{735,5 \times S} = \frac{p' S}{20},$$

qui donne

$$S = I \sqrt{\frac{20 \rho p T}{735,5 \times p'}}.$$

Cette formule résout complètement le problème proposé; mais, pour en faciliter le calcul, il convient de la transformer.

Désignons par N le nombre de secondes contenues dans l'année entière, et par f la fraction de journée que dure le travail, nous aurons

$$T = fN;$$

si nous appelons P le prix d'un cheval marchant jour et nuit pendant toute l'année, nous aurons

$$p = \frac{P}{N}.$$

Enfin, si nous appelons P′ le prix de 1^{mc} du conducteur, nous aurons

$$p' = \frac{P'}{10^6}.$$

En introduisant ces valeurs dans l'expression établie plus haut, il vient

$$S = I\sqrt{\frac{20 \times 10^6 \times f\rho P}{735,5 P'}},$$

qui est l'équation le plus souvent employée; dans cette expression les prix P, P′ peuvent être exprimés en monnaie d'espèce quelconque, parce que leur rapport $\frac{P}{P'}$ entre seul dans le calcul.

Exemple I. — (*a*) Nous citerons d'abord un exemple que l'on trouve dans tous les Traités (¹).

On suppose que, pour utiliser une force gratuite, comme celle d'une chute d'eau, il faut une dépense de 10 livres sterling

---

(¹) Alfr. von Urbanitzky, *Die elekt. Beleuchtungs Anlagen.* — *Elektr. Bibl.*, p. 47, Band XI. — A. Merling, *Die elekt. Beleuchtung. E. Bibl.*, vol. I, p. 409. — R. Ferrini, *I recenti progressi dell' elettricita*, p. 550; Milano, 1884.

Pour ramener la formule précédente à celle de Ferrini, on appelle

L le prix du watt en 1^s.

Si l'on suppose l'année $= 31,5 \times 10^6$ secondes et le cheval $= 735,5$ watts, on a

$$P = 735,5 \times L \times 31,5 \times 10^6.$$

En appelant L′ le prix de 1^{cc} du conducteur, on a d'autre part

$$P' = 10^6 L'.$$

Ces valeurs donnent

$$S = I\sqrt{\frac{20 \times 10^6 \times f\rho \times L \times 31,5}{L'}},$$

$$S = 10^4 I\sqrt{6,3 \times f\rho \frac{L}{L'}},$$

comme l'indique Ferrini (avec une erreur d'impression, 7,3 au lieu de 6,3). Dans l'exemple qui suit, on aurait

$$L = \frac{10 \text{ livres sterling}}{735,5 \times 31,5 \times 10^6} = 43 \times 10^{-11},$$

$$L' = 62 \times 10^{-6}.$$

par cheval fourni sans interruption pendant toute l'année, et que le cuivre destiné à la fabrication du conducteur coûte 0,00062 livre sterling par centimètre cube. Dans ces conditions

$$\frac{P}{P'} = \frac{10}{620}.$$

Si le travail dure douze heures par jour pendant toute l'année, on pose $f = 0,5$.

La résistance spécifique du cuivre est

$$\rho = \frac{1640}{10^9} \text{ ohms};$$

on a donc

$$S = I\sqrt{\frac{20 \times 10^6 \times 0,5 \times 1640 \times 10}{735,5 \times 10^9 \times 620}},$$

$$S = 0^{cq},019 I.$$

Si, par exemple, $I = 21$ ampères, il vient

$$S = 0^{cq},399 \quad \text{et} \quad d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = 0^c,71,$$

résultat qui concorde avec le résultat obtenu par le Dr Urbanitzky (*Ouvrage cité*).

La valeur $S = 0,19 I$ donnée par d'autres auteurs, qui expriment I en unités simples, est identique à la précédente, parce que 21 ampères, par exemple, correspondent à 2,1 unités simples.

(*b*) Avec les valeurs que l'on a attribuées ci-dessus à f, P, P', le transport des 2100 chevaux d'énergie du Niagara à New-York, dont il a été question, exigerait un fil de cuivre de section

$$S = 0,019 \times 240 = 4^{cq},56$$

et de diamètre

$$d = 2^c,4.$$

Exemple II. — (*a*) Dans un exemple donné par Schellen [1], on suppose le rapport

$$\frac{P}{P'} = \frac{300}{19580} = \frac{10}{653} \quad \text{et} \quad f = 0,41.$$

---

[1] *Die magn. und dynamo-elekt. Maschinen*, 3e édition. p. 841.

D'ailleurs, la résistance de 1^{m} de fil de cuivre de 1^{mmq} de section est 0,017, ce qui donne, pour $1^{cq},0$ de section et $0^{m},01$ de longueur,

$$\rho = \frac{0,017}{100 \times 100} = \frac{1700}{10^{9}} \text{ ohms.}$$

Avec ces données, nous obtenons

$$S = I\sqrt{\frac{20 \times 10^{6} \times 0,41 \times 1700 \times 300}{735,5 \times 10^{9} \times 19580}},$$

$$S = 0^{cq},017\,I = 1^{mmq},70\,I.$$

(*b*) Si l'on suppose le conducteur en fer, on pose

$$\frac{P}{P'} = \frac{300}{1950}, \quad \rho = \frac{12500}{10^{9}} \text{ ohms;}$$

il vient

$$S = I\sqrt{\frac{20 \times 10^{6} \times 0,41 \times 12500 \times 300}{735,5 \times 10^{9} \times 1950}},$$

$$S = 0^{cq},146\,I = 14^{mmq},61.$$

Les deux résultats concordent assez bien avec ceux que Schellen a présentés.

Tableau des rapports des unités de mesure les plus usitées, à la latitude de 45° et au niveau de la mer.

1 dyne.....	$0^{gr},0010198$
1 mégadyne.....	$1^{kg},020$

$$1 \text{ erg} = \begin{cases} \frac{102}{10^{5}} \text{ grammes-centimètres,} \\ \frac{102}{10^{10}} \text{ kilogrammètres,} \\ \frac{136}{10^{12}} \text{ chevaux de } 75^{kgm}, \\ \frac{134}{10^{12}} \begin{cases} \text{chevaux de } 76^{kgm} \\ \text{ou} \\ \text{horse-power.} \end{cases} \end{cases}$$

$$1 \text{ watt} = \left\{ \begin{array}{c} \text{appelé} \\ \text{souvent} \\ \text{volt-ampère} \end{array} \right\} = 10^7 \text{ ergs} = \left\{ \begin{array}{l} 0,102 \times 10^2 \text{ gramme-centim.}, \\ 0,102 \text{ kilogrammètre}, \\ \frac{136}{10^5} \text{ chevaux de } 75^{kgm}, \\ \frac{134}{10^5} \left\{ \begin{array}{c} \text{chevaux de } 76^{kgm}, \\ \text{ou} \\ \text{horse-power.} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

1 gramme..... 980,61 dynes
1 kilogramme..... $980,61 \times 10^3$ dynes

$$1 \text{ gramme-centimètre} = \left\{ \begin{array}{l} 980,61 \text{ ergs}, \\ \frac{980,61}{10^7} \text{ watts.} \end{array} \right.$$

$$1 \text{ kilogrammètre} = \left\{ \begin{array}{l} 980,61 \times 10^5 \text{ ergs}, \\ 9,8061 \text{ watts.} \end{array} \right.$$

$$1 \left\{ \begin{array}{c} \text{foot-pound} \\ \text{pied-livre} \\ \text{anglais} \end{array} \right\} = 0^{kgm},13826 = \left\{ \begin{array}{l} 135,58 \times 10^5 \text{ ergs}, \\ 1,3558 \text{ watts.} \end{array} \right.$$

$$1 \text{ cheval de } 75^{kgm} = \left\{ \begin{array}{l} 735,46 \times 10^7 \text{ ergs}, \\ 735,46 \text{ watts.} \end{array} \right.$$

$$1 \left\{ \begin{array}{c} \text{horse-power} \\ \text{cheval anglais} \\ \text{de } 76^{kgm} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 746 \times 10^7 \text{ ergs}, \\ 746 \text{ watts.} \end{array} \right.$$

$$\text{Équiv. mécanique de 1 cal.-gramme} = \left\{ \begin{array}{l} 4,2 \times 10^7 \text{ ergs}, \\ 4,2 \text{ watts.} \end{array} \right.$$

$$\text{Équivalent calorifique de 1 erg} = \frac{24}{10^{12}} \text{ calorie-gramme.}$$

$$\text{Équivalent calorifique de 1 watt} = \left\{ \begin{array}{l} 0,24 \text{ calorie-gramme.} \\ \text{Cette fraction de calorie-} \\ \text{gramme est appelée } \textit{Joule} \text{ par} \\ \text{quelques auteurs.} \end{array} \right.$$

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES.

Accélération. Équation de dimension, p. 12.
— De la pesanteur, p. 16.
Air. Densité absolue, p. 16.
— Chaleur spécifique, p. 24.
Ampère. Unité technique, p. 48.
— Légal, p. 48.
Ampère et Weber, p. 51.
Ampère-heure, p. 66.
Argent. Équivalent électrochimique, p. 65.
Baromètre. De la mégadyne prise pour étalon de la pression normale, p. 17.
Bougie. Unités de lumière anglaise, allemande, ..., p. 44.
Bronze phosphoreux et silicieux, p. 103.
Bunsen. Dimensions de cette pile, p. 50.
Câbles sous-marins. Leur capacité, p. 61.
Calorie-gramme. Son équivalent en ergs et en watts, p. 21, 59.
— Fraction de calorie prise pour unité, p. 21, 59.
Capacité électrique, U.E.S., p. 27.
— U.E.M., p. 34.
Capacité des câbles, p. 61.
— Du globe terrestre et du Soleil, p. 62.
— Inductive (diélectrique) et son rapport avec l'indice de réfraction, p. 39.
Carcel. Unité de lumière, p. 44.
Chaleur engendrée par le courant et températures qui en résultent, p. 78.
— Absorbée par une lampe, p. 83.
— Observation de Maxwell à ce sujet, p. 91.
— Spécifique des gaz à pression constante et à volume constant, p. 24.
Charbon. Son pouvoir calorifique et son utilisation dans les machines, p. 22.
Cheval-vapeur. Son rapport avec l'erg, p. 20.
— Et watt, p. 59.
— Son équivalent lumineux, p. 83.
Combustions. Énergie mécanique de quelques combustions, p. 22.
Condensateur. Calcul de son travail, avec différentes U.E.S., p. 29.
— Chargé d'un coulomb, p. 53.
— D'une capacité d'un farad, p. 54.
Conducteurs pour le transport électrique de l'énergie : comment on détermine leur section, p. 106.
Congrès des Électriciens de Paris 1881, p. 42.
— 1884, p. 44, 45, 48.
Contact. Théorie voltaïque, p. 96.
Coulomb. Unité technique, p. 52.
— Son action électrolytique, p. 63.
— Travaux différents effectués par un même nombre de coulombs, p. 68.
Courant. Intensité en U.E.S., p. 27.
— U.E.M., p. 31.

— Travail produit, p. 74.
— Chaleur produite, p. 78.
Coulomb et Weber, p. 51.
Daniell (pile). Son potentiel, p. 29, 47.
— Diverses données sur cette pile, p. 50.
— Exemple du travail, p. 77.
— Décomposition de l'eau, p. 88.
— Travail de cette pile; sa force électromotrice, p. 91.
Daniell U.S. Unité de mesure, p. 66.
Densité absolue des corps, p. 14.
— De l'eau, p. 14.
— De l'oxygène, de l'hydrogène, de la vapeur d'eau, ..., p. 15.
— Du mercure, p. 17.
Dimension (équations de), p. 6.
Dyne. Unité de mesure : son rapport avec le gramme, p. 16.
Eau. Décomposition, p. 65, 87.
— Force nécessaire pour décomposer une molécule, p. 74.
Électrolyses produites par le passage d'un coulomb, p. 64.
— Opérées avec deux équivalents électriques, p. 69.
Équivalent électrique. Sa valeur en coulombs, p. 68.
— En unités E.S., p. 72.
— Son rapport avec le nombre des molécules, p. 73.
Équivalent électrochimique, p. 63.
— De l'argent, p. 65.
Erg. Unité de mesure : son rapport avec les autres mesures, p. 19, 20, 21.
Éther. Son rôle dans la transmission des actions électriques, p. 41.
Farad. Unité technique, p. 53.
— Condensateur d'une capacité d'un, p. 54.
Foot-pound (pied-livre), p. 20.
Force. Équation de dimension, p. 12.
— Centrifuge à l'équateur, sa valeur en dynes, p. 18.
— Électromotrice en U.E.S., p. 27.
— Électromotrice en U.E.M., p. 33.
— Nécessaire pour décomposer l'eau, p. 87.
Force vive. Chaleur équivalente, p. 23.
Foudre. Ses effets comparés à ceux d'un coulomb, p. 72.
Fusion. Courant nécessaire pour fondre un fil donné, p. 82.
Gramme. Ce qu'on entend par masse-gramme, p. 13.
— Son rapport avec la dyne, p. 16.
Gramme-centimètre. Son rapport avec l'erg, p. 19.
— Son rapport avec le watt, p. 58.
Holtz (machine de). Ses mesures en ohms, volts, ..., p. 51.
Hydrogène. Sa densité absolue, volume d'une masse-gramme, p. 15.
— Pouvoir calorifique, p. 23.
— Chaleur spécifique, p. 25.
— Équivalent électrochimique, p. 64.
Intensité du courant, p. 31, 32.
Jacobi-unité. Son rapport avec l'ampère, p. 66.
Joule-unité, p. 58.
Joule (loi de), p. 78.
Kilogrammètre, p. 19, 60.
Lampes électriques, p. 44, 47, 49.
— Rendement, p. 83.
Lampe Swan et le Soleil, p. 89.
Magnétisme (unité de), p. 30.
Mégadyne et kilogramme, p. 16.
Microfarad. Valeurs et échantillons, p. 54, 55.
Molécules de gaz. Leur nombre dans 1cc, p. 73.
Niagara (chute du), p. 106.
Ohm. Unité technique, p. 43.
— B. A. et ohm légal, p. 45, 46.
Oxygène. Densité absolue, p. 15.
Pile. Théorie du contact, p. 96.
— Italienne des télégraphes, p. 50.

— Autres modèles; voir *Bunsen*, *Daniell*.
Potentiel (U.E.S.), p. 27.
— (U.E.M.), p. 33.
— Des machines électriques, p. 29, 48.
— Voir *Force électromotrice*.
Quantité électrique (U.E.S.), p. 27.
— (U.E.M.), p, 33.
Quantité et intensité de courant, p. 31.
— Rapport des unités E.S. et E.M., p. 36.
Réfraction (indice de) et capacité inductive, p. 39.
Rendement. Diverses espèces, p. 83, 89.
Résistance (U.E.S.), p. 28.
— (U.E.M.), p. 33.
— Spécifique de divers corps, p. 98.
— Ses variations suivant la température, p. 100.
— D'un fil en fonction de sa longueur et de son poids, p. 102.
Siemens. Unité pratique, p. 46.
Soleil et lampes à incandescence, p. 89.
Sûreté (fils de), p. 82.
Système de mesures absolues C.G.S., p. 12.
— Raisons qui l'ont fait préférer au système M.G.S., p. 14.
— Quart du méridien terrestre, $G \times 10^{-11}$, S., p. 56.
Systèmes divers, p. 26.
Température d'un fil parcouru par un courant, p. 79.
Transmission électrique de l'énergie, p. 81, 87.
— Choix des conducteurs, p. 106.
Travail chimique et force électromotrice de la pile Bunsen, p. 93.
Travail. Équation de dimension, p. 12.
Travail (exemple de), p. 81.
Unités absolues en général, p. 1.
— Rapport entre les unités de même nom appartenant à des systèmes différents, p. 25.
— Rapport des valeurs numériques d'une même grandeur rapportée à des unités différentes, p. 26.
Unités fondamentales C.G.S., p. 13.
— Unités absolues mécaniques, p. 11.
— absolues électrostatiques, p. 27, 28.
— Électrostatiques et unités électromagnétiques : leurs rapports, p. 35.
— Absolues électromagnétiques, p. 30.
— Techniques, p. 42, 56.
— De lumière, p. 44.
Vitesse. Son équation de dimension, p. 14.
— *Critique* de Weber, p. 36, 38
— De l'électricité, p. 39.
Volt-Ampère, p. 60.
Volt. Unité technique, p. 46.
Watt. Unité technique, p. 58.
— Prix d'un watt obtenu avec la pile Daniell, p. 94.
Weber et Ampère, p. 51.

11152 Paris. — Imprimerie de GAUTHIER-VILLARS, quai des Augustins, 55.

Phys 3468.86
Traite elementaire des mec
Cabot Science
3 2044 091 9